

УДК 550.835

**ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ РАДИОИЗОТОПНОГО ГАММА-АЛЬБЕДНОГО
КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА УГЛЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ВЕЩЕСТВЕННОГО СОСТАВА**

Ю. Н. Пак, Д. Ю. Пак

*Карагандинский государственный технический университет МОН РК,
E-mail: pak_gos@mail.ru, ул. Бульвар Мира, 56, 100027, г. Караганда, Республика Казахстан*

Предложен вариант радиоизотопного гамма-альбедного метода экспрессного контроля зольности угля, обеспечивающий удовлетворительную точность анализа в условиях непостоянства элементного состава минеральной массы. Показано, что интегральная интенсивность вторичного (рассеянного и флуоресцентного) излучения, ослабленного фильтром определенной толщины, служит однозначным показателем зольности. Разработана аналитическая модель для оптимизации параметров фильтрации вторичного излучения. Определены условия полезности ослабляющего фильтра в зависимости от зольности угля и вещественного состава.

Контроль зольности, гамма-альбедный метод, интегральная интенсивность вторичного излучения, оптимизация толщины фильтра

DOI: 10.15372/FTPRPI20180221

Потребность в получении оперативной информации о качестве угля в процессе его добычи и переработки и несовершенство стандартного термовесового способа определения зольности, обусловленное его деструктивностью, низкой экспрессностью и малой представительностью анализа, стали причиной для разработки более совершенных инструментальных физических методов. Среди них особое место занимает гамма-альбедный метод, основанный на регистрации рассеянного углем гамма-излучения [1, 2].

Практический интерес к данному методу вызван его сравнительно высокой чувствительностью к зольности, простотой аппаратной реализации и оперативностью недеструктивного анализа. Однако широкая применимость большинства модификаций гамма-альбедного метода сдерживается невысокой точностью анализа в условиях колебаний вещественного состава минеральной части углей. Проблема усугубляется возрастающим объемом механизированной добычи угля в сложных горно-геологических условиях, приводящей к увеличению степени засоренности угля породой.

В основу гамма-альбедного метода контроля зольности угля положена связь между эффективным атомным номером Z как интегральной характеристикой угля и его зольностью A . Уголь как объект ядерно-физического контроля — сложное соединение, включающее органическую массу и смесь минеральных компонентов, представленную как легкими (Na, Mg, Al, Si, S), так и более тяжелыми (K, Ca, Fe) элементами. Свыше 94 % всей золообразующей массы приходится на соединения алюминия, кремния, кальция и железа. Алумосиликаты составляют значительную (75 %) и наиболее устойчивую часть минеральной массы углей большинства месторождений.

Устойчивость взаимосвязи эффективного атомного номера угля и его зольности определяется компонентным составом минеральной (золообразующей) части угля и колебаниями содержания отдельных компонентов, прежде всего тяжелых. Принимая во внимание различие в атомных номерах составных компонентов золы, а следовательно, и в значениях массовых коэффициентов ослабления гамма-излучения, можно говорить об определяющем влиянии колебаний содержания тяжелых элементов (железа и кальция) на точность измерения зольности по величине альbedo гамма-излучения.

Расчетными исследованиями установлено, что при изменении зольности угля на 10 % (при среднем составе золы, %: Al_2O_3 — 20, SiO_2 — 55, CaO — 15, Fe_2O_3 — 10) значение эффективного атомного номера угля меняется на 0.85 ед. При естественной флуктуации величины Z только на 0.1 ед. погрешность определения зольности составит 1.2 % абс.

Таким образом, задача повышения точности контроля зольности угля по величине альbedo гамма-излучения сводится к поиску путей снижения дестабилизирующего действия непостоянства элементного состава минеральной части, в частности железа и кальция.

В практике радиоизотопного гамма-альбедного метода контроля зольности угля известны методические приемы, позволяющие снизить мешающее влияние железа на результаты определения зольности, например при использовании спектрометрии рассеянного на малые углы гамма-излучения [2]. Однако сложность обработки результатов спектрометрических измерений, связанная с решением системы нелинейных уравнений, ограничивает применение данной методики случаями анализа угля с небольшим диапазоном вариаций вещественного состава.

Повысить точность гамма-альбедного анализа угля можно отдельной регистрацией когерентно и некогерентно рассеянного гамма-излучения и определением зольности угля по отношению измеренных интенсивностей [2]. Методика эффективна с точки зрения снижения влияния непостоянства железа в золе при использовании низкоэнергетического гамма-излучения, при котором возрастает вероятность когерентного рассеяния, и наличии прецезионного спектрометра с высоким энергетическим разрешением.

Важным аспектом практической реализации гамма-альбедного анализа углей является выбор оптимальных параметров метода, обеспечивающих высокую чувствительность и точность контроля зольности в условиях действия возмущающих факторов. Теоретическими [2] и экспериментальными [2] исследованиями гамма-альбедного метода установлено, что чувствительность к зольности от энергии первичного гамма-излучения имеет инверсионный характер с максимумом в интервале около 8–20 кэВ. Точную оценку метрологических характеристик и возможностей метода можно осуществить на основе аналитических расчетов интенсивностей рассеянного гамма-излучения от ядерно-физических свойств анализируемого угля. Достаточно точное аналитическое выражение для интенсивности рассеянного гамма-излучения в приближении однократного взаимодействия дано в [2]:

$$N_S = N_0 \sigma_0 (\mu_0 + \mu_S)^{-1}, \quad (1)$$

где N_0 — интенсивность первичного гамма-излучения; σ_0 — массовый коэффициент рассеяния первичного гамма-излучения углем; μ_0 , μ_S — массовые коэффициенты ослабления соответственно первичного и рассеянного излучений.

Уголь представлен трехкомпонентной смесью углерода и минеральной (золообразующей) массы в виде алюмосиликатов и соединений тяжелых элементов (кальция, железа). Следуя этой модели, массовые коэффициенты взаимодействия гамма-излучения (σ_0 , μ_0 , μ_S) рассчитываются исходя из принципа аддитивности:

$$\begin{aligned}\sigma_0 &= \sigma_0^C + A\Delta\sigma + m\Delta\sigma', \\ \mu_0 &= \mu_0^C + A\Delta\mu_0 + m\Delta\mu'_0, \\ \mu_S &= \mu_S^C + A\Delta\mu_S + m\Delta\mu'_S,\end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned}\Delta\sigma &= \sigma_0^H - \sigma_0^C; & \Delta\sigma' &= \sigma_0^T - \sigma_0^H; \\ \Delta\mu &= \mu_0^H - \mu_0^C, & \Delta\mu'_0 &= \mu_0^T - \mu_0^H, \\ \Delta\mu_S &= \mu_S^H - \mu_S^C; & \Delta\mu'_S &= \mu_S^T - \mu_S^H,\end{aligned}$$

m — содержание тяжелого золообразующего компонента.

Индексы C, T, H относятся соответственно к углероду, тяжелому компоненту и наполнителю золы (алюмосиликаты). Расчетными исследованиями величины альbedo гамма-излучения от содержания тяжелых компонентов, в частности железа (рис. 1а) и кальция (рис. 1б), выполненными для различных энергий первичного гамма-излучения, показана неоднозначность интенсивности рассеянных гамма-квантов от состава золы. Это объясняется различием составных компонентов золы в коэффициентах ослабления излучений. Некоторое снижение дифференциации результатов при изменении содержания железа и кальция в золе, наблюдаемые при уменьшении энергии первичного гамма-излучения, объясняется преобладанием когерентного рассеяния. Качественно обратный характер изменения интенсивности от содержания железа при энергии 5.9 кэВ обусловлен тем, что за счет скачкообразного поведения коэффициента фотоэлектрического поглощения гамма-квантов при переходе энергии через потенциал ионизации железа ($E_K = 7.11$ кэВ) железо по гамма-поглощающим свойствам становится примерно сопоставимым с алюминием.

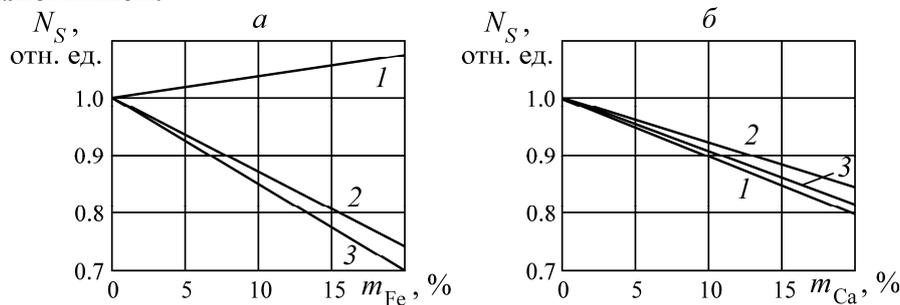


Рис. 1. Зависимости интенсивности рассеянного гамма-излучения от содержания в золе железа (а) и кальция (б), кэВ: 1 — 5.9; 2 — 8; 3 — 16

Согласно результатам исследований величины альbedo гамма-излучения (рис. 1а) при использовании первичного гамма-излучения с энергией выше E_K железа (кривые 2, 3), изменение содержания железа в золе только на 3% приводит к ошибке определения зольности (1.7–2.2)% абс. Учесть возмущающее влияние колебаний концентрации железа возможно возбуждением и регистрацией его рентгеновской флуоресценции. Ранее [2] установлено, что интенсивность рентгеновской флуоресценции железа используется в качестве корректирующего параметра, компенсирующего влияние непостоянства железа на результаты определения зольности по величине альbedo гамма-излучения. Компенсационный принцип, реализованный с применением тритий-циркониевой мишени (~8 кэВ), обеспечивает достаточно высокую чувствительность гамма-альбедного метода к зольности и позволяет эффективно возбуждать рентгеновскую флуоресценцию железа (~6.4 кэВ). Качественно различный характер изменения интенсивностей рассеянного углем гамма-излучения и флуоресцентного излучения железа при вариации содержания железа в золе дает возможность нивелировать влияние непостоянства

содержания железа посредством измерения интегральной интенсивности вторичного (рассеянного и флуоресцентного) излучения. При изменении содержания железа в золе приращение интенсивности флуоресцентного излучения выше приращения рассеянного излучения. Выбором определенной толщины ослабляющего фильтра из легкого элемента можно добиться равенства обратных по знаку абсолютных приращений интенсивностей флуоресцентного и рассеянного излучений при вариации содержания железа в золе.

Оптимальная толщина ослабляющего фильтра, найденная по минимальной чувствительности интегральной интенсивности вторичного излучения к железу, сложным образом зависит от зольности угля и диапазона колебаний железа в золе. Предложены номограммы для выбора оптимальной толщины фильтра и определения погрешности измерения зольности за счет дисперсии содержания железа [4]. Компенсационный гамма-альбедный метод по интегральной интенсивности вторичного излучения с регистрацией рентгеновской флуоресценции железа исключает влияние железа только для средних значений A^d и m_{Fe} . Это ограничивает область применения номограммы для выбора оптимальной толщины фильтра. При этом предложенный метод не устраняет влияние непостоянства в золе содержания кальция. В выбранном интервале энергий первичного гамма-излучения: 8 кэВ (H_3-Zr), 16 кэВ ($Pu-238$) их массовые коэффициенты ослабления для кальция и алюмосиликатов различаются почти в 3 раза, что делает Z золы более неустойчивым в условиях непостоянства ее вещественного состава.

Представленные на рис. 1б зависимости величины альбеда гамма-излучения разных энергий от содержания кальция в золе свидетельствуют о том, что оптимальным является выбор энергии 5.9 кэВ. В этом случае, ввиду равенства железа и алюминия в гамма-ослабляющих свойствах, трехкомпонентную золу (алюмосиликаты, оксиды кальция и железа) можно аппроксимировать двухкомпонентной смесью алюмосиликатов и оксида кальция. Нетрудно представить, что величина альбеда гамма-излучения будет неоднозначно связана с зольностью угля. Причиной неоднозначности служит различие составных компонентов золы (алюмосиликаты и оксид кальция) в коэффициентах ослабления и некоррелируемое с зольностью угля перераспределение вещественного состава золы.

Экспериментально исследована возможность уменьшения влияния непостоянства концентрации кальция в золе на результаты определения зольности за счет измерения интегральной интенсивности рассеянного углем гамма-излучения радионуклида Fe-55 (5.9 кэВ) и рентгеновского флуоресцентного излучения кальция (~3.7 кэВ). Инвариантность суммарной интенсивности вторичного излучения при колебании содержания кальция в золе обеспечена фильтрацией вторичного излучения. В качестве фильтрующего элемента выбран алюминий, у которого массовый коэффициент ослабления рентгеновской флуоресценции кальция почти в 4 раза превышает таковой для рассеянного излучения [3].

Для теоретического обоснования компенсационной методики учета возмущающего действия непостоянства кальция исследованы закономерности изменения интенсивности рентгеновской флуоресценции от зольности угля и состава золы. В качестве расчетной модели выбран уголь, минеральная (золообразующая) масса которого представлена смесью SiO_2 (0.4); Al_2O_3 (0.25), Fe_2O_3 (0.15) и CaO (0.2). В скобках указаны их долевые концентрации в золе. В процессе моделирования непостоянства химического состава золы CaO замещался Al_2O_3 . Такой вариант замещения наиболее контрастно отражает возмущающее влияние кальция на результаты определения зольности угля.

Интенсивность рентгеновской флуоресценции кальция, следуя этой модели, записывается выражением [2]:

$$N_i = N_0 W_K (S_K - 1) S_K^{-1} \tau m A (\mu_0 + \mu_i)^{-1}, \quad (2)$$

где W_K — коэффициент выхода флуоресценции кальция; S_K — величина K -скачка поглощения кальция; τ — массовый коэффициент фотоэлектрического поглощения первичного гамма-излучения кальцием; m — содержание кальция в золе; A — зольность угля; μ_i — массовый коэффициент ослабления флуоресцентного излучения кальция углем, который рассчитывается согласно принципу аддитивности аналогично μ_0 .

Исследованиями установлено, что интенсивность рентгеновской флуоресценции кальция связана с его содержанием в золе линейной зависимостью, закономерно изменяющейся от зольности угля. Причем, чем выше зольность угля, тем интенсивность флуоресцентного излучения кальция более независима от его содержания в золе. Качественно иной характер изменения интенсивностей рассеянного (1) и флуоресцентного (2) излучений с изменением концентрации кальция в золе независимо от зольности угля позволяет в качестве аналитического сигнала для ее определения использовать величину интегральной интенсивности вторичного излучения. Добиться более однозначного поведения интегральной интенсивности от зольности угля в условиях переменного содержания кальция в золе можно путем искусственного ослабления вторичного излучения фильтром, избирательно подавляющим флуоресцентное излучение кальция.

На рис. 2 представлены зависимости интегральной интенсивности вторичного излучения (рассеянного и флуоресцентного) кальция от содержания оксида кальция в золе для углей различной зольности и при различной степени фильтрации вторичного излучения. Материалом фильтра, установленного на входном окне пропорционального детектора СИ-11Р, служил алюминий. Величина аналитического сигнала находится в сложной зависимости от концентрации CaO в золе, зольности угля и степени фильтрации (толщины фильтра). При недостаточной фильтрации (рис. 2а) с увеличением эффективного атомного номера золы (увеличение CaO) во вторичном излучении преобладает рентгеновская флуоресценция кальция и не достигается компенсационный эффект.

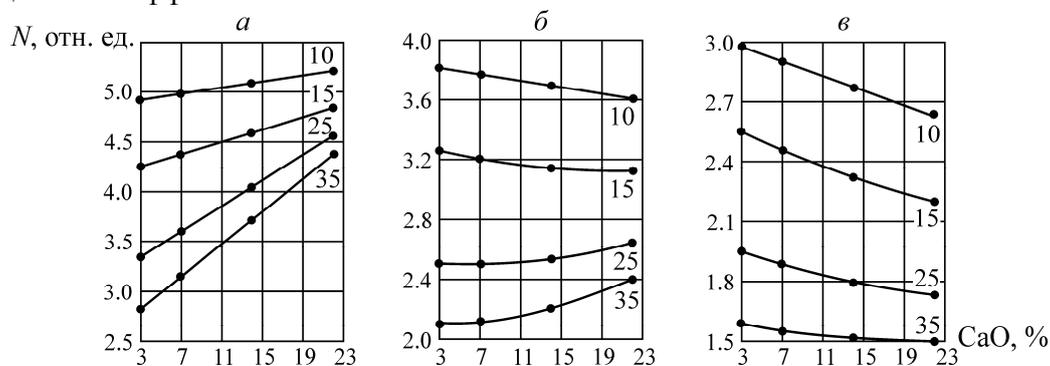


Рис. 2. Зависимости интегральной интенсивности вторичного излучения от содержания CaO в золе: а — с фильтром $d = 1 \text{ мг/см}^2$; б — с фильтром $d = 3 \text{ мг/см}^2$; в — с фильтром $d = 5 \text{ мг/см}^2$. Цифры на кривых — зольность, %

При толщине фильтра 3 мг/см^2 (рис. 2б) в ограниченном диапазоне изменения зольности (15–25) % наблюдается инвариантность интегральной интенсивности при колебании CaO в интервале 5–15 %. Для высокозольных углей (рис. 2в) независимость аналитического сигнала от вариаций CaO достигается при большой толщине ослабляющего фильтра. Таким образом, области нечувствительности метода к кальцию различны в зависимости от зольности угля и степени фильтрации вторичного излучения. Повышение и снижение интегральной интенсивности вторичного излучения в зависимости от концентрации кальция в золе вызваны недокомпенсацией флуоресцентного излучения при малой либо перекомпенсацией при большой толщине фильтра.

Эти выводы подтверждаются экспериментальными зависимостями интегральной интенсивности вторичного излучения от толщины ослабляющего фильтра, полученными на угольных пробах различного состава и качества (рис. 3). Выявлен инверсионный характер интенсивности вторичного излучения от состава золы. Область инверсии, возникающая при определенной толщине фильтра, свидетельствует о независимости интегральной интенсивности от изменения содержания оксида кальция. Область пересечения кривых, соответствующих углям одной зольности, но с различным содержанием оксида кальция, смещается в зависимости от зольности угля. Левее области инверсии превалирующую роль в интегральной интенсивности играет флуоресцентное излучение. Обратная картина наблюдается в заинверсионной области (правее области инверсии), где во вторичном излучении преобладает рассеянное гамма-излучение. Различие в пропускной способности ослабляющего фильтра по отношению к рентгеновской флуоресценции кальция и рассеянному гамма-излучению приводит к закономерному смещению области инверсии в зависимости от качества угля.

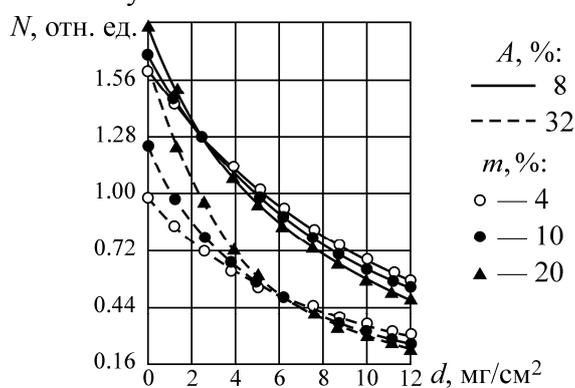


Рис. 3. Зависимости интегральной интенсивности вторичного излучения от толщины фильтра

Выявлено, что интегральная интенсивность вторичного излучения, ослабленного фильтром конечной толщины, служит однозначной характеристикой зольности только для ограниченного диапазона ее изменения.

Предложено оптимальную величину ослабляющего фильтра находить из условия минимальной чувствительности аналитического сигнала к кальцию S_{Ca} как мешающему фактору и максимальной чувствительности к зольности S_A как к определяемому параметру по соотношению

$$\sqrt{\left(\frac{S_{Ca}}{S_A}\right)^2} \cdot D_{Ca} = \min, \tag{3}$$

где D_{Ca} — дисперсия содержания кальция в золе.

Величина данного отношения чувствительностей численно характеризует погрешность определения зольности при единичном отклонении содержания кальция в золе.

Дифференцируя (1) и (2) последовательно по dA и dm и нормируя полученные выражения соответственно к N_S и N_i , запишем выражения для расчета относительных чувствительностей:

$$S_A = \frac{N_S}{N} S_A^S + \frac{N_i}{N} S_A^i, \tag{4}$$

$$S_{Ca} = \frac{N_S}{N} S_{Ca}^S + \frac{N_i}{N} S_{Ca}^i,$$

где N — интегральная интенсивность вторичного гамма-излучения; S_A^S , S_A^i — чувствительность к зольности, соответственно по рассеянному гамма-излучению и флуоресцентному излучению; S_{Ca}^S , S_{Ca}^i — чувствительность к кальцию по рассеянному гамма-излучению и флуоресцентному излучению соответственно.

На рис. 4 представлены расчетные зависимости отношения чувствительностей S_{Ca}/S_A от зольности угля и содержания кальция в золе, полученные при фильтре 5.4 мг/см^2 .

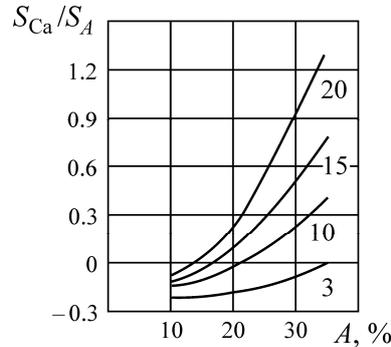


Рис. 4. Зависимости отношения чувствительностей S_{Ca}/S_A от зольности угля при $d = 5.4 \text{ мг/см}^2$. Цифры на кривых — содержание CaO в золе, %

Знакопеременный характер зависимостей S_{Ca} и S_A от толщины фильтра предопределяет сложное поведение отношения S_{Ca}/S_A в зависимости от зольности и содержания кальция. При низких концентрациях кальция (3 %) отношение чувствительностей близко к нулю для высокозольных углей ($A \approx 35 \%$). При содержании CaO, равном 10 %, полный компенсационный эффект наблюдается для угля с зольностью примерно 20 %. Для углей с высоким содержанием CaO в золе (20 %) инвариантность результатов от вариаций CaO достигается при зольности примерно 14 %.

Таким образом, выбор оптимальной толщины ослабляющего фильтра с точки зрения минимума методической погрешности за счет вариаций концентрации CaO в золе является сложной функцией, зависящей от зольности угля, диапазона ее колебаний и содержания в золе CaO. Значения d , A и m , при которых отношение чувствительностей S_{Ca}/S_A будет наименьшим, следует признать близкими к оптимальным.

Предложен аналитический подход к решению задачи определения оптимальной толщины фильтра на основе равенства обратных по знаку абсолютных приращений интенсивностей рассеянного и флуоресцентного излучений при единичном изменении содержания кальция [4]. Исходя из этого условия, найдено выражение для толщины ослабляющего фильтра:

$$d = \ln \frac{N_i S_{Ca}^i}{N_S S_{Ca}^S} (\mu_1 - \mu_2)^{-1}, \quad (5)$$

где μ_1 , μ_2 — массовые коэффициенты ослабления соответственно флуоресцентного и рассеянного излучений фильтром.

Полученное соотношение, позволяющее моделировать уголь разного качества и различные схемы замещения золообразующей части, наиболее приближено к реальным условиям, так как оно выражено через аппаратно измеряемые параметры (N_i , N_S , S_{Ca}^i , S_{Ca}^S).

Экспериментальная апробация методики контроля качества угля выполнена на базе рентгеновской аппаратуры БРА-7 с радионуклидным источником Fe-55 активностью $\sim 10^8$ Бк. Амплитудное разрешение пропорционального детектора по линии 5.9 кэВ составило 24 %.

В процессе апробации исследованы 34 пробы обогащенных углей с зольностью 8.2–13.6%. Содержание оксида кальция в золе колебалось в пределах 3.6–12.1%. Для этого диапазона колебаний зольности выбран ослабляющий фильтр из алюминия толщиной 4.8 мг/см².

Экспериментальная зависимость показаний метода (относительной интенсивности N вторичного излучения с выбранным фильтром) от зольности угля A аппроксимирована уравнением регрессии: $N = 4.532 - 0.064A$. Эмпирический коэффициент корреляции этой линейной зависимости составил 0.982, что свидетельствует о высокой надежности установленной взаимосвязи.

Результаты измерений зольности угольных проб предлагаемым методом (A_{Π}), известным методом ($A_{И}$) по интенсивности рассеянного излучения в сопоставлении с данными химического анализа ($A_{Х}$) по ГОСТу даны в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Результаты измерения зольности угля, %

Номер пробы	Значение зольности			Разность	
	A_{Π}	$A_{И}$	$A_{Х}$	$A_{\Pi} - A_{Х}$	$A_{И} - A_{Х}$
1	10.0	10.4	9.7	+0.3	+0.7
2	10.5	9.6	10.5	0	-0.9
3	8.7	9.7	9.0	-0.3	+0.7
4	11.4	13.0	11.2	+0.2	+1.8
5	11.9	13.0	11.6	+0.3	+1.4
6	12.4	10.6	12.9	-0.5	-2.3
7	9.6	9.4	9.2	+0.4	+0.2
8	8.9	8.9	8.6	+0.3	+0.3
9	9.1	7.7	8.7	+0.4	-1.0
10	9.9	9.9	9.6	+0.3	+0.3
11	10.1	9.6	10.5	-0.4	-0.9
12	10.5	11.1	10.2	+0.3	+0.9
13	10.4	9.3	10.8	-0.4	-1.5
14	11.2	9.8	10.8	+0.4	-1.0
15	13.0	14.5	12.6	+0.4	+1.9
16	8.2	8.9	8.5	-0.3	+0.4
17	8.2	9.6	8.4	-0.2	+1.2
18	13.4	11.7	13.1	+0.3	-1.4
19	8.3	7.6	8.6	-0.3	-1.0
20	8.6	8.9	8.2	+0.4	+0.7
21	12.8	11.1	13.2	-0.4	-2.1
22	13.6	14.9	13.3	+0.3	+1.4
23	9.2	9.9	8.8	+0.4	+1.1
24	13.2	15.9	13.4	-0.2	+2.5
25	9.1	9.0	9.4	-0.3	-0.4
26	9.5	9.1	9.9	-0.4	-0.8
27	10.2	8.9	9.8	+0.4	-0.9
28	9.9	10.6	9.6	+0.3	+1.0
29	11.0	9.6	11.3	-0.3	-1.7
30	11.4	13.8	11.8	-0.4	+2.0
31	12.4	9.9	12.1	+0.3	-2.2
32	11.8	13.4	11.8	0	+1.6
33	9.1	8.3	9.4	-0.3	-1.1
34	8.2	7.4	8.3	-0.1	-0.9

Радиоизотопный гамма-альбедный метод по интегральной интенсивности вторичного излучения за счет компенсации влияния переменного содержания кальция ($S_{Ca} = 0.06\%$) позволяет добиться высокой точности анализа угля (табл. 2). Среднеквадратическое отклонение результатов предлагаемого компенсационного метода от данных химического анализа составило 0.33% абс. при длительности измерения зольности одной пробы угля 5 мин.

Оценка правильности данной методики по t -критерию [5] Стьюдента показала, что расхождения между результатами инструментального и химического методов анализа 34 проб углей в диапазоне вариаций зольности (8.2 – 13.6) % не носят систематический характер, а обусловлены случайными погрешностями. Погрешность известного гамма-альбедного способа без компенсации (по интенсивности рассеянного гамма-излучения) почти в 4 раза выше.

ТАБЛИЦА 2. Метрологические характеристики гамма-альбедного метода

Модификация гамма-альбедного метода	S_A	S_{Ca}	S_{Ca}/S_A	σ , % абс.
По интегральной интенсивности вторичного излучения	1.62	0.06	0.037	0.33
По интенсивности рассеянного гамма-излучения	1.86	0.64	0.344	1.34

Таким образом, предлагаемый компенсационный метод по интегральной интенсивности вторичного излучения в силу удовлетворительной точности и высокой экспрессности анализа может использоваться для оперативного контроля качества в процессе массовых измерений.

ВЫВОДЫ

Предложен радиоизотопный гамма-альбедный метод, основанный на измерении интегральной интенсивности вторичного излучения (рассеянного и флуоресцентного), ослабленного фильтром определенной толщины, позволяющий минимизировать влияние непостоянства вещественного состава на результаты контроля зольности угля.

Теоретическими и экспериментальными исследованиями на моделях углей известного состава и качества установлен инверсионный характер интенсивностей вторичного излучения от содержания оксида кальция в золе. Определены области инверсии, природа доинверсионной и заинверсионных характеристик и закономерности их смещения в зависимости от состава и качества угля, позволяющие оптимизировать параметры фильтрации вторичного излучения.

Предложены аналитические модели для оптимизации степени фильтрации вторичного излучения, основанные на равенстве обратных по знаку абсолютных приращений рассеянного и флуоресцентного излучений при единичном изменении содержания кальция и минимизации методической погрешности определения зольности угля в условиях дисперсии содержания кальция как мешающего параметра. Высокая оперативность анализа и удовлетворительная его точность позволяют рекомендовать предлагаемый метод для массового экспресс-контроля качества углей переменного химического состава.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клемпнер К. С., Васильев А. Г. Физические методы контроля зольности угля. — М.: Недра, 1978. — 176 с.
2. Старчик Л. П., Пак Ю. Н. Ядерно-физические методы контроля качества твердого топлива. — М.: Недра, 1985. — 224 с.
3. Сторм Э., Израэль Х. Сечения взаимодействия гамма-излучения. — М.: Атомиздат, 1973. — 256 с.
4. Pak Yu. N. and Pak D. Yu. High-speed radioisotopic quality monitoring of coal of variable composition, Coke and Chemistry, 2011, Vol. 54, No 4. — P. 108–113.
5. Налимов В. В. Применение математической статистики при анализе вещества. — М.: Физматгиз, 1960. — 432 с.

Поступила в редакцию 27/VII 2016