

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ МЕТОДА ДВУХЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ РЕНТГЕНОВСКОЙ АБСОРБЦИОМЕТРИИ МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ ОБРАЗЦОВ ПЕРЕМЕННОГО СОСТАВА

© 2012 г. Н. А. Антропов, Д. А. Карпов, Ю. Ю. Крючков

Томский политехнический университет

Россия, 634050, Томск, просп. Ленина, 30

E-mail: куу@tpu.ru

Поступила в редакцию 03.10.2011 г.

После доработки 08.12.2011 г.

Теоретически обоснована и экспериментально показана возможность использования линейного уравнения связи между массовыми коэффициентами ослабления для двух энергий при определении плотности вещества методом двухэнергетической рентгеновской абсорбциометрии для многоэлементных объектов переменного состава. Относительная погрешность измерения плотности водно-солевых и водно-спиртовых растворов составила 0.5% при максимальном изменении массового коэффициента ослабления для K_{α} -линии циркония 70%.

В настоящее время для измерения плотности веществ широко используют рентгеновское и γ -излучение одной или двух энергий — одно- или двухэнергетическая абсорбциометрия. Двухэнергетическая абсорбциометрия нашла применение в медицине, но пока не используется в промышленности. Это связано с тем, что при измерении плотности многоэлементных объектов переменного состава изменение массового коэффициента ослабления μ приводит к погрешности определения плотности образца ρ . При использовании излучения одной энергии массовый коэффициент ослабления считают постоянным и для определения плотности используют табличные значения. Для уменьшения влияния вариации массового коэффициента ослабления на результаты измерения плотности используют высокоэнергетическое излучение, так как с ростом энергии излучения абсолютные значения массового коэффициента ослабления элементов стремятся к нулю (сходятся) и, следовательно, изменение этого коэффициента для многоэлементных образцов с изменением состава будет меньше. При измерении плотности многих объектов, например грунтов или бетонов, наименьшая погрешность радиоизотопных γ -плотномеров составляет 1.5–2% [1].

В медицине повышение точности определения плотности позволяет обеспечить диагностику заболеваний на более ранних стадиях. Поэтому здесь для снижения погрешности при анализе образцов используют пучки излучения двух энергий. В работе [2] при измерении “минеральной” плотности кости с использованием двухэнергетической рентгеновской абсорбциометрии погрешность определения плотности удалось снизить до

0.5%. Однако и в этом случае использовались табличные значения массового коэффициента ослабления [3], что ограничивает дальнейшее снижение погрешности при измерениях *in vivo*.

Целью данной работы является теоретическое обоснование и экспериментальное подтверждение возможности использования линейного уравнения связи между массовыми коэффициентами ослабления для определения плотности многоэлементных сред с переменным составом.

Прохождение двухэнергетического излучения через образец можно описать с помощью следующей системы уравнений:

$$\begin{aligned} J' &= J'_0 e^{-\mu' \rho x}, \\ J'' &= J''_0 e^{-\mu'' \rho x}, \end{aligned} \quad (1)$$

где J' , J'' и J'_0 , J''_0 — интенсивности прошедшего и падающего излучения; μ' , μ'' — массовые коэффициенты ослабления излучения образца; ρ , x — соответственно плотность и толщина анализируемого образца. В выражении (1) и далее по тексту индексами в виде одного и двух штрихов обозначено излучение с низкой и высокой энергией соответственно. В системе уравнений (1) ρ , μ' , μ'' являются неизвестными, толщину образца считаем известной.

Для образца, состоящего из нескольких элементов, массовый коэффициент ослабления будет определяться выражением:

$$\mu = \sum \mu_i c_i, \quad (2)$$

где μ_i — массовый коэффициент ослабления i -го элемента, входящего в состав образца; c_i — относительная массовая доля этого элемента в смеси.

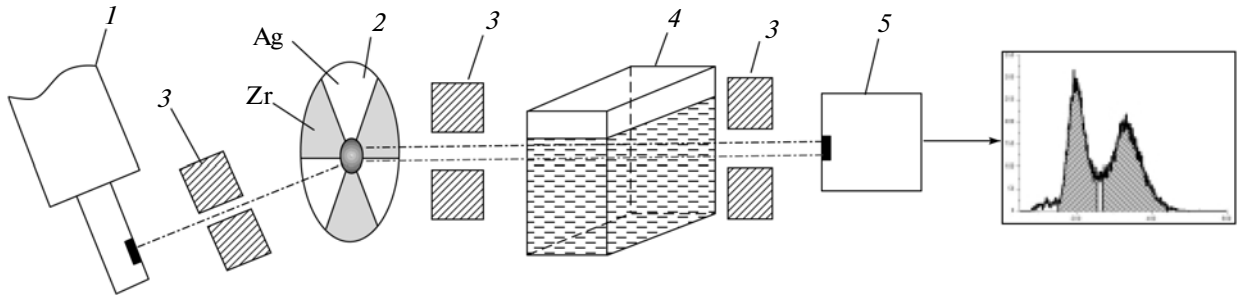


Рис. 1. Схема установки РЕТРАН. 1 – рентгеновская трубка БХ-10; 2 – вторичная мишень; 3 – коллиматор; 4 – кювета; 5 – пропорциональный детектор СИ12-Р.

Для решения системы уравнений (1) предложено использовать следующее уравнение связи:

$$\mu' = a + b\mu'', \quad (3)$$

где μ' , μ'' определяются из выражения (3); a и b – произвольные константы, через которые выражается линейность между массовыми коэффициентами ослабления.

Для веществ переменного состава, как следует из выражения (2), μ' и μ'' являются функциями, зависящими от одних и тех же переменных – массовых долей c_i элементов в смеси, а сами μ'_i и μ''_i будут постоянными коэффициентами при этих переменных. В общем случае никакой определенной зависимости между μ' и μ'' *может и не быть*, а линейная зависимость между ними будет только в том случае, когда коэффициенты μ'_i будут линейно зависеть от μ''_i .

Вдали от краев поглощения рентгеновского или γ -излучения можно подобрать такие значения энергии, для которых массовые коэффициенты ослабления μ'_i и μ''_i будут являться монотонными функциями, зависящими от одного и того же аргумента – порядкового номера элемента Z : $\mu = f(Z)$ [4]. В этом случае μ'_i и μ''_i будут являться параметрически заданными функциями, а значит, между ними будет определенная зависимость [5]. При этом всегда можно подобрать две близко лежащие энергии, для которых будет одинаковая зависимость от Z , а это в свою очередь означает, что зависимость между μ'_i и μ''_i будет линейной.

Решая систему уравнений (1), с учетом (3) получим выражение для определения плотности многокомпонентной среды с переменным составом:

$$\rho = K_1 \ln \frac{N'_0}{N'} - K_2 \ln \frac{N''_0}{N''}, \quad (4)$$

где N'_0 , N' и N''_0 , N'' – число зарегистрированных импульсов в пике излучения низкой и высокой энергии соответственно в отсутствие и в присут-

ствии пробы в измерительной кювете ($N = kJ$, где k – эффективность регистрации детектора, J – интенсивность излучения); K_1 и K_2 – калибровочные коэффициенты, значения которых определяют из измерений стандартных образцов с известной плотностью.

Для экспериментальной проверки выдвинутой гипотезы были использованы: дистиллированная вода двойной очистки, два водно-солевых ($H_2O + NCL$) и пять водно-спиртовых ($H_2O + C_2H_5OH$) растворов с плотностью в диапазоне от 853 до 1030 $кг/м^3$. В качестве энергетических линий были выбраны K_α -линия серебра (22 кэВ) и K_α -линия циркония (15.8 кэВ).

Энергетические линии выбраны так, чтобы изменение массового коэффициента ослабления для них было значительно больше 1%. Например, для растворов с крайними значениями плотности 853 и 1030 $кг/м^3$ расчетные значения массового коэффициента ослабления, полученные из выражения (2), составили: для циркония – $\mu' = 0.113 м^2/кг$ и $\mu'' = 0.191 м^2/кг$, для серебра – $\mu' = 0.065 м^2/кг$ и $\mu'' = 0.097 м^2/кг$. Табличные значения μ_i для элементов, входящих в растворы, взяты из работы [4]. Вариация массового коэффициента ослабления для линии циркония составила 70%. Плотность растворов, определенная ареометрами АН с ценой деления 0.5 $кг/м^3$, принималась за эталонную [6]. Измерения массовых коэффициентов ослабления μ' и μ'' и плотности приготовленных растворов были выполнены на лабораторной установке РЕТРАН, которая является опытным макетом, подготовленным для метрологической аттестации в качестве средства измерения плотности неагрессивных растворов в диапазоне от 700 до 1500 $кг/м^3$.

Схема установки представлена на рис. 1. В ее состав входит стандартная аппаратура. Источником рентгеновского излучения является рентгеновская трубка БХ-10 (1) (максимальное напряжение 50 кВ, максимальный ток 1 мА). Пучок тормозного рентгеновского излучения из трубки направляется через коллиматор 3 (диаметр 5 мм)

Результаты измерений характеристик для растворов разной плотности

Измеренные характеристики	Плотность приготовленного раствора ρ , кг/м ³							
	1030	1015	1000	937	917	902	883	853
Массовый коэффициент ослабления K_{α} -линии циркония μ' , м ² /кг	0.195	0.175	0.154	0.132	0.127	0.124	0.120	0.114
Массовый коэффициент ослабления K_{α} -линия серебра μ'' , м ² /кг	0.091	0.083	0.076	0.068	0.066	0.065	0.064	0.062
Измеренная плотность раствора $\rho_{\text{изм}}$, кг/м ³		1017	996	936	913	904	879	
Отклонение измеренной плотности от ареометрической, %		0.17	0.45	0.18	0.47	0.26	0.48	

на вторичную мишень 2, которая представляет собой диск диаметром 15 мм, состоящий из шести равных секторов: 3 сектора из серебряной фольги и 3 сектора из циркониевой. Мишень центровалась так, чтобы ось пучка из трубки и ось коллиматора 3 были нацелены в центр мишени. После мишени основными по интенсивности линиями пучка были K_{α} -линия серебра (22 кэВ) и K_{α} -линия циркония (15.8 кэВ). Далее пучок через коллиматор 3 (диаметр 2 мм) направлялся на кювету 4 с раствором, после чего – на окно пропорционального детектора СИ12-Р (5). Время измерения не превышало 180 с.

Массовые коэффициенты ослабления для циркония и серебра определялись из выражения

$$\mu = \frac{1}{\rho x} \ln \frac{N_0}{N}, \quad (5)$$

где ρ – ареометрическая плотность, x – толщина образца (в нашем случае она равна 23 мм).

При измерениях плотности в соответствии с выражением (4) по двум (используемым в качестве эталонных) растворам с известными плотностями 853 и 1030 кг/м³ были определены калибровочные коэффициенты K_1 и K_2 . Общая погрешность измерения, включая аппаратную и статистическую, не превысила 0.5%. Результаты измерений представлены в таблице. На их основе (см. таблицу, строки 2 и 3) построена зависимость $\mu'(\mu'')$ (рис. 2).

Из таблицы видно, что максимальное изменение массового коэффициента ослабления, наблюдаемое для линии циркония, достигает 70% (от 0.195 до 0.114 м²/кг), что хорошо согласуется с расчетными данными. Однако, даже при таком значительном изменении массового коэффициента ослабления, отклонение измеренной плотности от ареометрической не превысило 0.5%.

Из рис. 2 видно, что все точки зависимости μ' от μ'' в пределах погрешности измерений ложатся на прямую линию, т.е. зависимость $\mu'(\mu'')$ близка к линейной, что также согласуется с теоретическими предсказаниями.

Таким образом, экспериментально полученные результаты позволяют сделать вывод, что при прохождении двух пучков излучения с низкой и высокой энергиями через многоэлементный образец переменного состава зависимость между массовыми коэффициентами ослабления этих энергий близка к линейной. Исходя из этого заключения, систему уравнений (1) можно однозначно решить как относительно плотности, так и относительно массовых коэффициентов ослабления, т.е. измерения плотности и массовых коэффициентов ослабления становятся независимыми. В этом случае (с учетом уравнения связи) использование метода двухэнергетической рентгеновской абсорбциометрии позволяет исключить погрешность определения плотности, обусловленную изменением состава анализируемого объекта.

Метод можно использовать для анализа объектов, подверженных значительным изменениям. Измерение массовых коэффициентов ослабления позволяет получить дополнительную инфор-

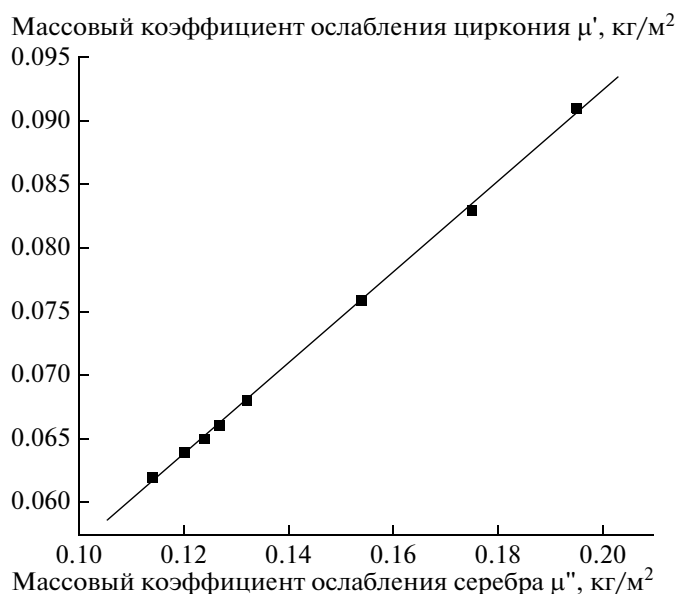


Рис. 2. Зависимость μ' от μ'' .

мацию, которая расширяет возможности анализа элементного состава объекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Герасимов А.В., Недавий О.И., Панкратов И.Б.* // Материалы Международной интернет-конференции “Архитектурно-строительное материаловедение на рубеже веков”. Белгород: Изд-во БелГТАСМ, 2002. С. 35.
2. *Moure A., Reichmann P., Gamba H.R.* // Phys. Med. Biol. 2003. V. 48. P. 3851.
3. *Colin E. Webber.* // Phys. Med. Biol. 2006. V. 51. P. 169.
4. *Анисович К.В., Вайнберг Э.И., Кантер Б.М. и др.* Рентгенотехника: Справочник. Том 1 / Под ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 1980.
5. *Выгодский М.Я.* Справочник по высшей математике. М.: АСТ Астрель, 2006.
6. ГОСТ 28947-91 (ИСО 1768-75) Ареометры стеклянные. Стандартное значение коэффициента объемного термического расширения (для использования при подготовке поправочных таблиц для жидкостей). М.: Изд-во стандартов, 1991.