

Күлділікті рентген-радиометриялық әдіспен анықтау әдістемесін негіздеу

¹*ТОКУШЕВА Жибек Хойтолеуевна, магистр, аға оқытушы, Itokusheva@mail.ru,

¹КАСКАТАЕВА Куралай Балапашовна, магистр, аға оқытушы, aigakk@mail.ru,

¹БОГОЛЮБОВА Наталья Валерьевна, магистр, аға оқытушы, gnipn@mail.ru,

¹САДЧИКОВ Александр Викторович, т.ғ.к., аға оқытушы, a.sadchikov@kstu.kz,

¹«Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті» КеАҚ, Қазақстан, Қарағанды, Н. Назарбаев даңғылы, 56,

*автор-корреспондент.

Аңдатпа. Зерттеудің мақсаты рентген-радиометриялық әдіспен күлді анықтау әдістемесін эксперименттік негіздеу болып табылады. Көмірдің күлділігін бақылаудың заманауи әдістеріне қысқаша шолу жасалады. Қатты отынның сапасын бақылаудың дербес бағыттарының бірі рентген-радиометриялық әдіс болып табылады. Көмірдің күлділігін анықтаудың дәлдігін арттыру үшін екі көзді қолдану әдісі ұсынылады. Көмірмен кері шашыраған екінші сәулеленуді және элементтердің флуоресцентті сәулеленуін қолданатын ұсынылған әдіс кері шашыраған сәулелену арқылы күлділікті анықтаудың танымал әдісіне қарағанда жақсы нәтиже береді.

Кілт сөздер: көмір сынамасы, күлділік, шашыраған гамма-сәулелену, рентген-радиометриялық әдіс, сипаттамалық сәулелену, сәулелену спектрі, регрессия теңдеуі.

Кіріспе

Отын-металлургия шикізатын өндіруді ұлғайту және оны ұтымды пайдалану көбінесе оны өндіру мен өңдеудің әр түрлі кезеңдеріндегі шикізаттың құрамы мен сапасы туралы ақпараттың тиімділігі мен сенімділігіне байланысты. Көмір мен тақтатастарды ұтымды пайдалану, оларды өндіру және байыту жағдайларын оңтайландыру үшін олардың күлділігі, минералды қоспалардың құрамы, жану жылуы, ылғалдылық, күкірт сияқты негізгі сапалық параметрлерін бақылау қажет.

Қатты отынның негізгі сапалық параметрлері сынамаларды іріктеуді, оларды бөлшектеуді, дайындауды және тікелей химиялық талдауды көздейтін химиялық талдаудың еңбекті көп қажет ететін және өнімсіз тәсілдерімен айқындалады. Сапаны бақылаудың стандартты әдісінің кемшіліктеріне мыналар жатады: бастапқы сынаманы алу басталғаннан бастап нәтижелерді берудің едәуір кідірісі, сынаудың үлкен қателігі, автоматтандырудың деструктивті сипаты мен күрделілігі.

Дәстүрлі әдістерден тиімді ерекшеленетін аспаптық ядролық-физикалық әдістер тау-кен металлургия циклінің барлық сатыларында: табиғи жатысы жағдайында, көлік ағынында, ұсақтаудың әр түрлі дәрежесіндегі сынамаларда көмірді бақылауға мүмкіндік береді.

Көмірдің сапасын анықтауда ядролық-физи-

калық әдістерді қолдану сенімді және жедел ақпарат береді. γ-сәулеленуді қолданатын әдістер ең танымал болды. Бұл әдістер бір жағынан көмірдің күлділігі, екінші жағынан көмірдің тығыздығы, эффективті реттік нөмірі және табиғи радиоактивтілігі арасындағы корреляцияны қолдануға негізделген [1].

Күлділікті анықтаудың белгілі әдісі көмірмен кері шашыраған сәулеленудің жалпы қарқындылығын және оның құрамындағы темірдің флуоресцентті сәулеленуін өлшеуді қамтиды. Сонымен қатар, темір концентрациясының өзгеруінің күлділікті анықтау нәтижелеріне әсері едәуір төмендейді, өйткені темір құрамының жоғарылауымен тіркелген сәулеленудің қарқындылығы, бір жағынан, көмірде шашыраған сәулеленудің темір атомдарының фотосіңірілуінің жоғарылауына байланысты төмендейді, ал екінші жағынан, темір атомдарының көп мөлшерінің флуоресценциясына байланысты артады [2].

Сапаны және ең алдымен күлділікті бақылау мәселесін шешудегі негізгі құл түзуші элементтердің рентгендік флуоресценциясын қоздыру мен тіркеуге негізделген рентген-радиометриялық әдіс тиімді бағыт болып табылады. Осы әдіспен күлді анықтау әдістемесін эксперименттік негіздеу қарастырылатын зерттеулердің мақсаты болып табылады.

Зерттеу әдістемесі

Көмірдің күлділігін анықтаудың дәлдігін арттыру үшін екі көзді қолдану әдісі ұсынылады. Көмір сынамасы алдымен темір-55 көзімен сәулеленеді, онда көмірмен шашыраған бастапқы сәулелену мен кальцийдің флуоресцентті сәулеленуі тіркеледі. Екінші кезеңде сынамаға плутоний-238 көзімен әсер етіледі, мұнда шашыраңқы және сипаттамалық темір сәулесі жазылады.

Күлдегі темірдің әрекетін зерттеу үлкен қызығушылық тудырады, өйткені темір ядролық-физикалық әдістерінің көпшілігінде негізгі әсер ететін факторлардың бірі болып табылады. Ауыр күл түзуші элементтердің (Fe+Ca) үлесінің артуы күл қалдықтарындағы жеңіл элементтердің (Al+Si) азаюымен бірге жүреді.

Энергиясы 7,1 кэВ-тен асатын кальций мен темір қосылыстарымен рентген сәулесінің әлсіреу коэффициенттері кремниймен алюминий қосылыстарының тиісті коэффициенттерінен едәуір жоғары екенін ескере отырып, кальций мен темір қосылыстарының өзгеруін есепке алу энергиясы көрсетілген шектен жоғары сәулелену көздерін пайдаланатын күлді бақылаудың рентген-радиометриялық әдістерінің дәлдігіне шешуші әсер етеді деп қорытынды жасауға болады [3].

Талдау іріліктегі көмір сынамасы алдымен Fe^{55} көзінің сәулелену аймағына түседі, онда көмірмен кері шашыраған бастапқы сәулелену және ол қоздыратын кальций $K\alpha$ -желілері тіркеледі, содан кейін – Pu^{238} көзінің сәулелену аймағына, онда көмірмен кері шашыраған бастапқы сәулелену және ол қоздыратын темір $K\alpha$ -желілері тіркеледі.

Сонымен бірге, көмірдің күлділігі туралы ақпараттың негізгі көзі тіркелген Pu^{238} сәулеленуінің қарқындылығы болып табылады, ал басқа тіркеу арналарындағы қарқындылық өлшеу нәтижелерін түзетуге қызмет етеді: флуоресцентті желілер тиісті элементтердің құрамы туралы ақпарат береді, ал Fe^{55} кері шашыраған сәулеленуді тіркеу алюминий мен кремний құрамының өзгеруіне сезімталдықты арттыруға мүмкіндік береді, бұл ауыр элементтердің концентрацияларының өзгеруі аясында орын алады.

Күлділікті бақылау әдістемесін жүзеге асыру үшін рентген-радиометриялық әдіспен Қарағанды бассейнінің көмір сынамаларының 40 үлгісі химиялық талдау бойынша күлдің белгілі мөндерімен зерттелді, олардың диапазоны 20,6-39,9% шегінде.

Көздерді энергетикалық градуирлеу модельдердегі спектрлерді тіркеу арқылы жүргізілді (құрамында темір мен кальций жеткілікті мөлшерде болатын көмір сынамалары).

Энергетикалық градуирлеудің мәні дискриминация деңгейінен γ -кванттардың энергия мәндеріне ауысу болып табылады. Тіркелген сәулелену энергиясының жұмыс диапазоны 3,7-20 кэВ шегінде болады. Сондықтан энергетикалық градуирлеуді орындау үшін Fe^{55} және Cd^{109} (22 кэВ) көздерін пайдалану ұсынылады. Сынама сәулелен-

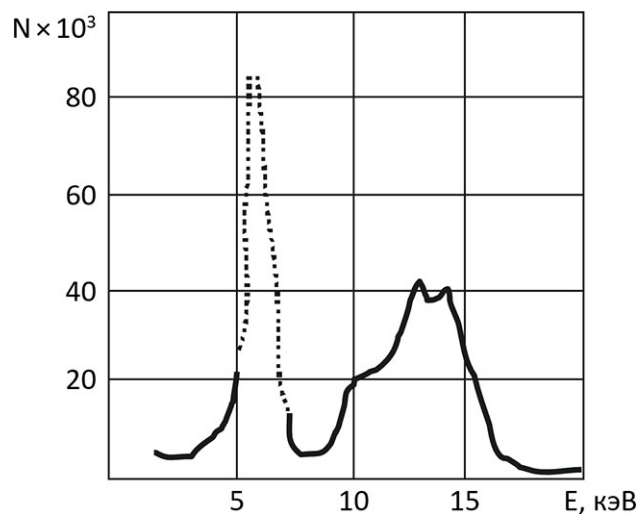
дірілгеннен кейін екінші сәулелену спектрінде осы элементтердің сипаттамалық сәулелену шыңы болады. Шыңның көрінетін бөлігінде болуы үшін есептегішке берілетін күшейту коэффициенті мен жоғары кернеуді реттеу қажет. Элементтің атомдық санын, демек, сипаттамалық сәулеленудің энергиясын және дискриминация деңгейінің шкаласында (импульстердің амплитудасы) осы сәулеленудің шыңының орнын біле отырып, нүкте тәуелділікке қойылады. Осылайша, темір мен кальцийдің сипаттамалық сәулеленуіне арналған нүктелер қойылады. Әрі қарай, Fe^{55} және Cd^{109} көздері кезек-кезек коллиматорға орналастырылады және тура сәулелену тікелей детекторға жіберіледі. Бұл жағдайда көздің спектрін алады. Бірінші жағдайға ұқсас, тәуелділікте нүктелері салынады. Төрт-бес нүкте бойынша градуирлеу тәуелділігі құрастырылады. Өлшеулер әр нүктеде екі кезеңде жүргізіледі. Бірінші кезеңде арнайы қорғасын пердесінің көмегімен Pu^{238} көзінің бастапқы сәулелену коллиматоры жабылады және Fe^{55} көзінің бастапқы сәулелену коллиматоры ашылады. Экспозиция уақыты (30с) өткеннен кейін кальцийдің сипаттамалық сәулелену қарқындылығы Ni^{Ca} және Fe^{55} көзінен көмірмен кері шашыраған сәулелену қарқындылығы $Ns^{Fe^{55}}$ есептеледі [4].

Екінші кезең – темірдің сипаттамалық сәулелену қарқындылығының Ni^{Fe} және Pu^{238} көзінен көмірмен кері шашыраған сәулелену қарқындылығының $Ns^{Pu^{238}}$ мәндерін алу. Операция бірінші кезеңге ұқсас жасалады.

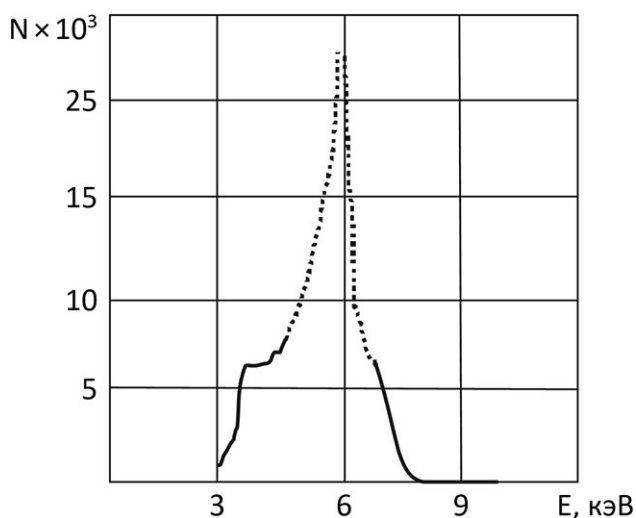
Аппараттық спектрлер 1 және 2-суреттерде көрсетілген.

Pu^{238} көзінен алынған спектрде сол жақ шың – бұл шығу шыңы, пропорционалды есептегіштерде бастапқы кванттарды есептегіш атомдарымен фотоэлектрлік сіңіру нәтижесінде толтырғыш газдың флуоресцентті сәулелену кванттары пайда болады.

Амплитудасы бойынша үлкен шың темірдің K-сериясының (6,4 кэВ) сипаттамалық сәулеленуі-



1-сурет – Pu^{238} көзінен аппаратуралық спектрі



2-сурет – Fe55 көзінен аппаратуралық спектрі

не, оң шың – көмірмен шашыраған сәулеленуге сәйкес келеді.

Fe⁵⁵ көзінен алынған спектрде сол жақ шың кальций K-сериясының сипаттамалық сәулеленуіне сәйкес келеді. Кальцийдің амплитудалық таралуының оң тармағы күрделіленген, бұл кальцийдің сипаттамалық сәулелену энергиясының (3,7 кэВ) және Fe⁵⁵ көзінің шашыраңқы сәулеленуінің (5,9 кэВ) жақын мәндерінің қабаттасуымен түсіндіріледі.

Спектрдің оң шыңы шашыраған көмір сәулесіне сәйкес келеді. Оның амплитудасының жоғары мәні темірдің күлдің ауыр құрамдас бөлігі болып табылатындығымен және шашыраңқы сәулеленудің қарқындылығына үлкен үлес қосатындығымен түсіндіріледі [5, 6].

Көп факторлы тәуелділіктерді табу үшін $A^d = f(N_S^{Pu238}, N_i^{Fe})$ және $A^d = f(N_S^{Fe55}, N_i^{Ca})$ күлділікті анықтау белгілі алгоритмі қолданылды:

$$A^d = a_0 + \frac{a_1}{N_s} + a_2 m, \quad (1)$$

мұндағы m – элементтің құрамы,

a_0, a_1, a_2 – регрессия теңдеуінің коэффициенттері.

Элементтің сипаттамалық сәулеленуінің қарқындылығы оның құрамына пропорционалды болғандықтан, (1) теңдеу осы зерттеулерге қатысты (2) және (3) түрінде жазылады:

$$A^d = a_0 + \frac{a_1}{N_S^{Pu238}} + a_2 N_i^{Fe}, \quad (2)$$

$$A^d = a_0 + \frac{a_1}{N_S^{Fe55}} + a_2 N_i^{Ca}. \quad (3)$$

Зерттеу нәтижелері

Теңдеудің коэффициенттерін табу ең кіші квадраттар әдісін қолдануға негізделген сызықтық функцияның көмегімен жүзеге асырылды. Регрессия теңдеулерінің статистикалық сипаттамалары анықталды (1-кесте).

Корреляция коэффициенті R және орташа квадраттық қате σ автоматты режимде есептеледі. Дисперсия (4) формула бойынша қолмен есептелді:

$$D = \frac{\sum_{i=1}^n (A^d - A_{pac}^d)^2}{n - m - 1}, \quad (4)$$

мұндағы A_{pac}^d – корреляциялық теңдеу бойынша есептелген күлділік;

n – сынамалар саны,

m – айнымалылар саны.

Өңдеу нәтижелері көмірдің күлділігі туралы ақпараттың негізгі көзі – Pu²³⁸ көзінен тіркелген сәулеленудің қарқындылығы болып табылады деген тұжырымды растайды.

Осы көзбен көмір күлділігі анықталған регрессия теңдеуі жоғары корреляция коэффициентімен (0,97) және төмен квадраттық қателігімен ($\pm 1,32\%$) сипатталады.

Fe⁵⁵ көзін пайдалану кезінде – корреляция коэффициенті 0,92 және орташа квадраттық қате $\pm 2,17\%$ құрайды.

Тек көмірмен шашыраған сәулеленуді қолданғанда регрессия теңдеулері мен статистикалық сипаттамалар анықталды (2-кесте). Регрессия теңдеуін анықтау үшін гиперболалық тәуелділік қолданылды.

Қорытындылар

1 және 2-кестелердегі статистикалық сипаттамалардың мәндерін салыстыра отырып, көмірмен кері шашыраған екінші сәулеленуді және элементтердің флуоресцентті сәулеленуін қолданатын ұсынылған әдіс кері шашыраған сәулеленудің күлділігін анықтау әдісіне қарағанда жақсы нәтиже береді деп қорытынды жасауға болады.

1-кесте – Өңдеу нәтижелері

Регрессия теңдеуі	R корреляция коэффициенті	σ орташа квадраттық қате	D дисперсия
$A^d = 13,59 + \frac{172304,5}{N_S^{Fe55}} - 0,0029817 \cdot N_i^{Ca}$	0,92	$\pm 2,17\%$	4,7
$A^d = -6,67 + \frac{453710,3}{N_S^{Pu238}} + 0,002114$	0,97	$\pm 1,32\%$	1,74

2-кесте – Өңдеу нәтижелері			
Регрессия теңдеуі	R корреляция коэффициенті	σ орташа квадраттық қате	D дисперсия
$A^d = 2 \cdot 10^7 (N_S^{Fe55})^2 - 0,0068 N_S^{Fe55} + 68,711$	0,91	±2,26%	5,12
$A^d = 2 \cdot 10^7 (N_S^{Pu238})^2 - 0,0071 N_S^{Pu238} + 96,951$	0,9	±1,55%	2,4

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. D.Yu. Pak. Nuclear-physical methods of coal analysis // Издательство Карту, 2021, 175 с. Монография.
2. Yu. Pak, D.Yu. Pak, Zh. Nuguzhinov. Increasing sensitivity of coal analysis by gamma-albedo method. Applied Radiation and Isotopes, 149, pp. 104-107. 2019.
3. Yu.N. Pak, D.Yu. Pak. Parameter Optimization of the Radioisotope Gamma Albedo Method for Controlling Quality of Variable Composition Coals // Journal of Mining Science, Vol. 54, No. 2, pp. 352-360. 2018.
4. Zamyatiin N.I., Bystritsky V.M., Kopach Y.N., Aliyev F.A., Grozdanov D.N., Fedorov N.A., Hramko C., Ruskov I.N., Skoy V.R., Stepnev V.M., Wang D., Zubarev E.V. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerations, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2018. V. 898. P. 46.
5. Yu. Pak, D.Yu. Pak, M. Ponomaryova, M. Imanov, B. Balbekova. Express measurement of solid fuel ash content by nuclear gamma-method // Applied Radiation and Isotopes, 147, pp. 54-58. 2019.
6. Пак Ю.Н., Пак Д.Ю. Оптимизация параметров радиоизотопного гамма-альбедного контроля качества углей переменного вещественного состава // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2018. № 2. С. 187-195.

Обоснование методики определения зольности рентгенорадиометрическим методом

¹*ТОКУШЕВА Жибек Хойтолеуевна, магистр, старший преподаватель, Jtokusheva@mail.ru,

¹КАСКАТАЕВА Куралай Балапашовна, магистр, старший преподаватель, aigakk@mail.ru,

¹БОГОЛЮБОВА Наталья Валерьевна, магистр, старший преподаватель, gnipn@mail.ru,

¹АХМЕТЖАНОВА Аида Бахтияровна, к.т.н., старший преподаватель, a.sadchikov@kstu.kz,

¹НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова», Казахстан, Караганда, пр. Н. Назарбаева, 56,

*автор-корреспондент.

Аннотация. Целью исследований является экспериментальное обоснование методики определения зольности рентгено-радиометрическим методом. Дается краткий обзор современных методов контроля зольности угля. Одним из самостоятельных направлений контроля качества твердого топлива является рентгено-радиометрический метод. Для увеличения точности определения зольности угля предлагается методика с использованием двух источников. Предлагаемая методика, использующая обратно рассеянное углем вторичное излучение и флуоресцентное излучение элементов, дает лучшие результаты, чем известная методика определения зольности по обратно-рассеянному излучению.

Ключевые слова: проба угля, зольность, рассеянное γ-излучение, рентгено-радиометрический метод, характеристическое излучение, спектр излучений, уравнение регрессии.

Substantiation of the Methodology for Determining Ash Content by X-ray Radiometric Method

¹*TOKUSHEVA Zhibek, Master, Senior Lecturer, Jtokusheva@mail.ru,

¹KASKATAEVA Kuralay, Master, Senior Lecturer, aigakk@mail.ru,

¹BOGOLUBOVA Natalya, Master, Senior Lecturer, gnipn@mail.ru,

¹SADCHIKOV Alexander, Cand. of Tech. Sci., Senior Lecturer, a.sadchikov@kstu.kz,

¹NPISC «Abylkas Saginov Karaganda Technical University», Kazakhstan, Karaganda, N. Nazarbayev Avenue, 56,

*corresponding author.

Abstract. The purpose of the research is an experimental substantiation of the methodology for determining ash content by the X-ray radiometric method. A brief overview of modern methods of coal ash content control is given. One of the independent directions of solid fuel quality control is the X-ray radiometric method. To increase the accuracy of determining the ash content of coal, a technique using two sources is proposed. The proposed method, using secondary radiation backscattered by coal and fluorescent radiation of elements, gives better results than the well-known method for determining ash content by backscattered radiatio.

Keywords: *coal sample, ash content, scattered gamma radiation, x-ray radiometric method, characteristic radiation, radiation spectrum, regression equation.*

REFERENCES

1. D.Yu. Pak. Nuclear-physical methods of coal analysis // Karaganda 2021, Publ. KarTU, 175 p.
2. Yu. Pak, D.Yu. Pak, Zh. Nuguzhinov. Increasing sensitivity of coal analysis by gamma-albedo method. Applied Radiation and Isotopes, 149, pp. 104-107. 2019.
3. Yu.N. Pak, D.Yu. Pak. Parameter Optimization of the Radioisotope Gamma Albedo Method for Controlling Quality of Variable Composition Coals // Journal of Mining Science, Vol. 54, No. 2, pp. 352-360. 2018.
4. Zamyatiin N.I., Bystritsky V.M., Kopach Y.N., Aliyev F.A., Grozdanov D.N., Fedorov N.A., Hramko C., Ruskov I.N., Skoy V.R., Stepnev V.M., Wang D., Zubarev E.V. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerations, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2018.V. 898. P. 46.
5. Yu. Pak, D.Yu. Pak, M. Ponomaryova, M. Imanov, B. Balbekova. Express measurement of solid fuel ash content by nuclear gamma-method // Applied Radiation and Isotopes, 147, pp. 54-58. 2019.
6. Pak Yu.N., Pak D.Yu. Optimizacija parametrov radioizotopnogo gamma-al'bednogo kontrolja kachestva uglej peremennogo veshhestvennogo sostava [Optimization of the parameters of radioisotope gamma-albedo quality control of coals of variable material composition] // Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznyh iskopaemyh [Physical and technical problems of mineral development]. 2018. No. 2. Pp. 187-195.