

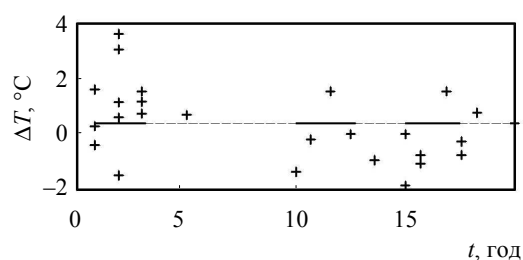
С использованием этих данных методом регрессионного анализа построена модель дрейфа отклонений показаний хромель-копелевых термоэлектрических преобразователей от исходных

$$\Delta T_{\text{др}}(t) = at^{\alpha}, \quad (3)$$

где коэффициент α при 300 °С равен 0,133 и 0,69 соответственно, при 350 °С — 0,148, $a = 0,62$. Результаты расчета по формуле (3) с учетом времени нахождения реактора в режиме «останов» показаны на рис. 1 (кривые 3, 4).

Платиновые термометры сопротивления, эксплуатирующиеся в ядерных энергетических установках, в течение длительного периода подвергались периодической поверке. Несмотря на значительный разброс (дисперсия составляет 1,474 °С²), в результате линеаризации данных методом наименьших квадратов построена модель отклонений показаний (на рис. 2 отмечены «+») термометров сопротивления от номинальной статической характеристики, в графической интерпретации представленная как неизменная величина. Этот вывод согласуется с экспериментальными исследованиями НИИАРа, в которых было установлено отсутствие дрейфа рабочих сигналов термометров сопротивления, эксплуатирующихся в реакторных условиях в течение 30 лет [4].

Разработанные модели (аналитические зависимости) дрейфа отклонений показаний термопреобразователей от номинальной статической характеристики и исходных значений позволяют прогнозировать их погрешности от температуры и радиационного облучения в течение назначенного срока службы (15 лет) в транспортных реакторах при доверительной вероятности 0,9. Результаты настоя-



Р и с. 2. Зависимость отклонения показаний от длительности эксплуатации термометров сопротивления

щей работы являются одной из основ метрологического обеспечения измерений температуры теплоносителя ядерных энергетических установок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Приймак С.В., Конотопов А.Н., Олейников П.П. и др. О дрейфе градуировочных характеристик термоэлектрических преобразователей в реакторных условиях. — Новые промышленные технологии, 2007, № 6, с. 38—42.
2. Логинов В.Н., Седов Н.С., Исаев А.А. и др. Состояние и пути повышения достоверности измерений температуры ЯЭУ. — Там же, с. 35—37.
3. Герашенко О.А., Гордов А.Н., Еремина А.К. и др. Температурные измерения. Справочник. Киев: Наукова думка, 1989. 704 с.
4. Рогожина И.В., Кушнер Ю.А. Метрологические исследования платиновых термометров сопротивления, бывших в эксплуатации 30 лет. Тезисы докл. 1-й Всерос. конф. по проблемам термометрии. Подольск, 2001, с. 41.

Поступило в Редакцию 28.10.11

УДК 621.039.8

СОДЕРЖАНИЕ γ -ИЗЛУЧАЮЩИХ ИЗОТОПОВ В ОБРАЗЦЕ УГЛЯ КАК МЕТОД ИДЕНТИФИКАЦИИ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Барabanов И.Р., Безруков Л.Б., Гаврилюк Ю.М., Гуренцов В.И., Кузьминов В.В., Якименко С.П.
(ИЯИ РАН, г. Москва)

При анализе возможностей использования в промышленных целях методов низкофоновой и высокоточной спектрометрии γ -излучения естественных долгоживущих радионуклидов было выдвинуто предположение, что однотипные угли из различных месторождений могут отличаться по составу таких изотопов. Это открывает возможность экспрессного высокоточного контроля сертифицируемой партии угля на соответствие заявленному происхождению путем измерения спектрального состава γ -излучения отобранной пробы или непосредственно внутри объема с углем и сравнения с изотопным паспортом месторождения. Для получения представления о возможностях

такого подхода было измерено содержание естественных радиоактивных элементов в тестовом образце угля.

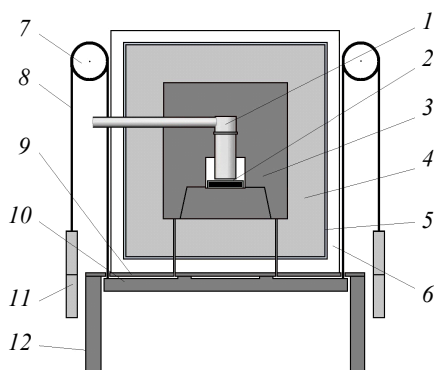
Методика измерений. К основным естественным долгоживущим радионуклидам относятся ^{40}K ($T_{1/2} = 1,26 \cdot 10^9$ лет, 0,0118% в естественном калии), ^{232}Th ($T_{1/2} = 1,41 \cdot 10^{10}$ лет, 100%) с дочерними радиоактивными продуктами распада и ^{238}U ($T_{1/2} = 4,51 \cdot 10^9$ лет, 99,3%) с дочерними продуктами распада [1]. Содержание долгоживущих естественных радиоактивных элементов в пробе угля определяли по методике, аналогичной описанной в работе [2]. Пробу исследуемого материала размещали в рабочей

полости низкофонового спектрометра γ -излучения непосредственно вокруг полупроводникового детектора из сверхчистого германия (полная масса кристалла 968 г, эффективная масса 642 г). Радионуклиды идентифицируются по характерным γ -линиям в измеренном спектре.

Удельную активность изотопа рассчитывали по следующей схеме. На основе пакета GEANT4 определяли эффективность регистрации для каждой γ -линии с учетом всех параметров детектора и измеряемого образца, затем площадь соответствующей линии за вычетом фона и с учетом эффективности полное количество испущенных образцом γ -квантов в единицу времени. Окончательно рассчитывали удельную активность на единицу массы образца с учетом коэффициента выхода γ -квантов на один распад данного изотопа.

При расчете активности ^{232}Th и ^{238}U по излучению дочерних изотопов предполагается, что соответствующие ряды находятся в равновесии.

Общий вид измерительной установки показан на рис. 1. В центре на подставке расположен сосуд Дьюара объемом 80 л, в который погружен вертикальный участок хладапровода германиевого детектора. Ge-кристалл ($d = 65$ мм, $h = 67$ мм) расположен на дне вертикального медного вакуумированного цилиндрического ($d = 80$ мм) кожуха, который присоединен к торцу горизонтального участка хладапровода, проложенного в канале низкофоновой защиты. Головная часть детектора находится внутри защиты, состоящей из 50—80 мм полиэтилена, 1 мм кадмия, 150 мм свинца и 180 мм меди. Вокруг головки имеется полость для размещения образцов. Ее геометрия может изменяться путем заполнения части объема цилиндром из высокочистой меди. Образцы в рабочий объем загружают снизу. Для этого часть дна защиты выполнена выдвижной и смонтирована на платформе лифтового подъемника. Сбоку защиты



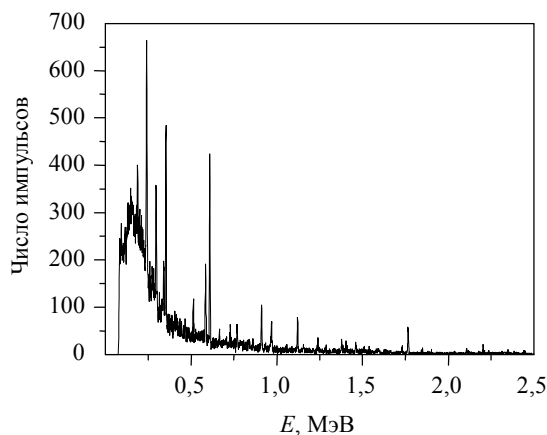
Р и с. 1. Общий вид подземной измерительной установки с низкофоным Ge-спектрометром (горизонтальный участок хладапровода условно развернут на 90°): 1 — головная часть Ge-детектора; 2 — образец; 3 — медь; 4 — свинец; 5 — кадмий; 6 — полиэтилен; 7 — шкив; 8 — трос; 9, 12 — подставка; 10 — платформа; 11 — противовес

расположен один из двух противовесов подъемника. Для установки образца платформа опускается на пол. Образец строго заданных предельных размеров размещается в специальном углублении верхней медной части перемещаемого блока защиты. Платформа поднимается, защита закрывается, и образец оказывается под головкой детектора.

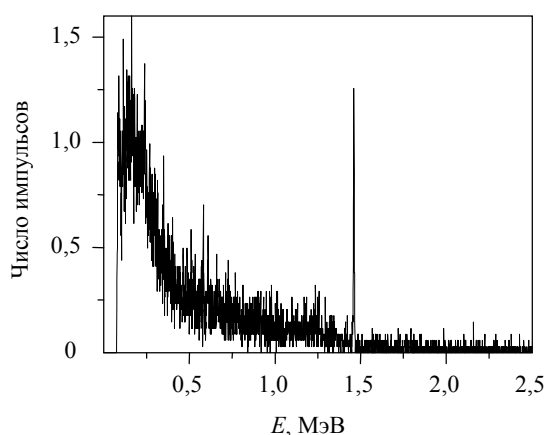
Для удаления из рабочей полости радиоактивного газа ^{222}Rn внутренний объем защиты продувается парами жидкого азота, выходящими из сосуда Дьюара. Пары направляются по медной трубке через верхний канал с хладапроводом и свободно выходят через щели в дне защиты. Верхняя часть медного слоя защиты герметизирована с помощью полиэтиленовой пленки и герметика. Сигналы с детектора снимаются с помощью зарядово-чувствительного предусилителя, установленного на площадке вблизи колена хладапровода. Импульсы формируются в усилителе при времени интегрирования $\tau_{\text{и}}$ и дифференцирования $\tau_{\text{д}}$ $\tau_{\text{и}} = \tau_{\text{д}} = 3$ мкс, и их полная форма записывается в цифровом виде с помощью платы ЛАН-20-12РСИ в память персонального компьютера. После накопления требуемого объема информации набор завершается, и данные обрабатываются на отдельном компьютере. При построении спектров анализируется полная форма импульса с исключением импульсов от наводок и пробоев. Их форма существенно отличается от импульсов детектора.

Установка введена в эксплуатацию в 2010 г. Она размещена в отдельной комнате подземной низкофоновой лаборатории НЛГЗ-4900 Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН на глубине 4900 м водного эквивалента. Толща грунта снижает поток космического излучения и фон примерно в 10^7 по сравнению с потоком на поверхности.

Результаты измерений. В течение 3422 ч был измерен собственный фон Ge-детектора в отсутствие образца. Спектр собственного фона, нормированный на 100 ч, приведен для интервала 0—1, 1—2, 2—3 и 3—4 МэВ на рис. 2. На спектре видны линии энергий



Р и с. 2. Спектр собственного фона Ge-детектора, нормированный на 100 ч



Р и с. 3. Спектр γ -излучения образца угля, нормированный на 100 ч

ей 1461 кэВ от ^{40}K , 2614 кэВ от ^{208}Tl (ряд ^{232}Th), 609 кэВ от ^{214}Bi (ряд ^{238}U). Полная скорость счета фона составила $4,4 \text{ ч}^{-1}$. Затем в защиту был установлен образец мелкодисперсного угля (пыль и крупинки) массой 173,9 г, упакованный в плоскую полиэтиленовую банку $d = 135 \text{ мм}$, $h = 15 \text{ мм}$. Его фон измеряли в течение 69 ч. Нормированный на 100 ч спектр фона этого образца показан на рис. 3. В спектре наблюдается множество γ -линий. Их характеристики приведены в таблице.

Анализ результатов. Среднее содержание естественных радиоактивных элементов в земных породах составляет $2,35 \cdot 10^{-2} \text{ г(K)/г(вещества)}$ или $2,77 \cdot 10^{-6} \text{ г}(^{40}\text{K})/\text{г(вещества)}$, $1 \cdot 10^{-5} \text{ г}(^{232}\text{Th})/\text{г}$, $4 \cdot 10^{-6} \text{ г(U)/г}$ и соотносится как $1,00(^{40}\text{K}) : 3,61(^{232}\text{Th}) : 1,44(^{238}\text{U})$. От распада ^{40}K , ^{232}Th с дочерними продуктами и ^{238}U с дочерними продуктами в грунте рождаются γ -кванты со скоростью $8,2 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1} \cdot (\text{г вещества})^{-1}$, $10,7 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1} \cdot \text{г}^{-1}$ и $10,7 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1} \cdot \text{г}^{-1}$ соответственно. Всего $\sim 0,3 \text{ с}^{-1} \cdot \text{г}^{-1}$. В условиях равновесия радиоактивного ряда количество образующихся и распадающихся ядер любого изотопа из ряда является постоянным и равным активности начального материнского изотопа

ряда. Активность ^{232}Th определяли по линиям 911,2 кэВ (^{228}Ac) и 2614,5 кэВ (^{208}Tl). При этом выбирали изотопы, лежащие на разных участках ряда и создающие достаточно различимые пики от своих γ -линий. Для ^{238}U использовали линии 1001 кэВ (^{234m}Pa) и 609 кэВ (^{214}Bi). Для подтверждения правильности процедуры вычисления материнских изотопов было определено содержание слаборадиоактивного естественного изотопа ^{235}U ($T_{1/2} = 4,51 \cdot 10^9 \text{ лет}$, 0,72%) двумя независимыми методами по стандартной схеме по линии 144 кэВ ($^{235}\text{U} + ^{223}\text{Ra}$) и пику энергией 186 кэВ, который возникает от распада ^{226}Ra (ряд ^{238}U) и собственно ^{235}U . Из условия равновесия в ряду ^{238}U был рассчитан вклад в пик ^{226}Ra и вычтен из полной скорости счета под пиком. По остаточной скорости счета было определено содержание ^{235}U в образце. В пределах статистических ошибок два значения совпали, что свидетельствует о хорошем качестве расчетов эффективности и надежности процедуры обработки экспериментальных данных.

Как видно из таблицы, в пределах ошибок активность изотопов, входящих в ряды ^{232}Th и ^{238}U , близка к равновесной, что позволяет приписать такую же активность материнским изотопам. Их расчетное содержание составляет $(5,1 \pm 0,9)10^{-9} \text{ г}(^{40}\text{K})/\text{г(вещества)}$, $(5,8 \pm 0,4)10^{-7} \text{ г}(^{232}\text{Th})/\text{г}$, $(3,0 \pm 0,1)10^{-7} \text{ г}(^{238}\text{U})/\text{г}$ и соотносится как $1,00(^{40}\text{K}) : 114(^{232}\text{Th}) : 58,8(^{238}\text{U})$. Видно, что оно существенно отличается от среднего. В угле содержится очень мало калия.

Таким образом, если абсолютное и относительное содержание радиоактивных элементов в углях различно для разных месторождений, то эти параметры могут быть использованы в качестве радиационного паспорта, сертифицирующего уголь из конкретной шахты.

Подобный метод использования радиационного паспорта вместе с низкофоновой техникой может

Характеристики γ -излучения образца угля

Изотоп	E , кэВ	Эффективность регистрации, %	Скорость счета под пиком, ч^{-1}	Фон под пиком, ч^{-1}	Удельная активность в образце, Бк/кг	Материнский изотоп	Содержание материнского изотопа, г/г
^{40}K	1461	0,86	0,79	$3,9 \cdot 10^{-2}$	$1,3 \pm 0,2$	^{40}K	$(5,1 \pm 0,9)10^{-9}$
^{208}Tl	2615	0,53	2,8	$7,7 \cdot 10^{-3}$	$0,85 \pm 0,06$	^{232}Th	$(5,8 \pm 0,4)10^{-7}$
^{214}Bi	609	1,62	17,6	$5,3 \cdot 10^{-3}$	$3,8 \pm 0,1$	^{238}U	$(3,0 \pm 0,1)10^{-7}$
^{228}Ac	911	1,22	4,6	$\leq 5,1 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \pm 0,1$	^{232}Th	$(5,5 \pm 0,4)10^{-7}$
^{234m}Pa	1001	1,07	0,21	$\leq 3,2 \cdot 10^{-3}$	$5,3 \pm 2,5$	^{238}U	$(4,3 \pm 2,0)10^{-7}$
^{226}Ra	186	3,68	5,8	$\leq 1,2 \cdot 10^{-2}$	$3,8 \pm 0,1$	^{238}U	$(2,9 \pm 0,8)10^{-9}$
^{235}U	144	3,89	0,8	$\leq 1,3 \cdot 10^{-2}$	$0,24 \pm 0,14$	^{235}U	$(3,0 \pm 1,8)10^{-9}$

быть применен для идентификации других материалов, а также отдельных предметов.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007—2013 годы» Министерства образования и науки РФ (контракт № 16.518.11.7072).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Таблицы физических величин.** Справочник. Под ред. И.К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976.
2. **Гаврилюк Ю.М., Гангапшев А.М., Гежаев А.М. и др.** Содержание радиоактивных изотопов в конструкционных материалах по данным подземного низкофонового полупроводникового спектрометра: Препринт ИЯИ РАН 1236, 2009.

Поступило в Редакцию 9.02.12

Рефераты статей

Окончание. Начало см. на с. 178

УДК 621.039-78

Шевяков А.Ю., Шишов В.Н., Новиков В.В. Разработка методики и исследование структурно-фазового состояния оксидной пленки сплава Э-635 на допеломной стадии окисления. — Атомная энергия, 2012, т. 113, вып. 3, с. 151—154.

Исследованы микроструктура и фазовый состав оксидной пленки толщиной 1 мкм, образованной при автоклавных испытаниях на направляющем канале из сплава Э-635. Исследования проводили методом трансмиссионной электронной микроскопии с применением рентгеноспектрального энергодисперсионного микроанализа. Отработана методика по подготовке тонких фольг из оксидных пленок. Электронно-микроскопические исследования проводили в трех различных сечениях оксидной пленки по ее толщине: вблизи границы раздела металл—оксид, в центральной и внешней части оксидной пленки. Определены структурно-фазовый состав оксидной пленки и трансформация фазы Лавеса по толщине пленки. Рис. 5, табл. 1, список лит. 5 назв.

УДК 621.384.6, 621.039.5

Полозов С.М., Фертман А.Д. Ускорители протонного пучка большой мощности для подкритических ядерных установок. — Атомная энергия, 2012, т. 113, вып. 3, с. 155—162.

В статье приведен обзор проектов создания ускорителей большой мощности для электроядерных установок. Дается краткое описание возможностей электроядерного метода получения энергии, а также использования ускорителей для трансмутации радиоактивных отходов, задач реакторного материаловедения. Приведены параметры действующих, строящихся и проектируемых в мире ускорителей для проектов подкритических реакторов, комплексов по утилизации отходов, мощных нейтронных генераторов. Рис. 3, табл. 1, список лит. 41 назв.

УДК 621.039.519.4

Тамбовцев С.Д., Дулин В.А., Раскач К.Ф. Исследование эффекта реактивности Доплера образцов реакторных материалов на критических сборках. — Атомная энергия, 2012, т. 113, вып. 3, с. 163—168.

Актуальность работы связана с необходимостью проверить точность оценки константной составляющей эффекта реактивности Доплера, зависящей от сечений, факторов самоэкранирования и спектра нейтронов. Была

поставлена задача исследовать эффект Доплера образцов реакторных материалов методом возмущения критичности сборок, моделирующих активную зону ЯЭУ с разным спектром нейтронов (задача изучения приращений эффектов реактивности при нагревании образцов). Сборка при этом оставалась холодной (комнатной температуры).

Эксперименты выполнены на двух критических сборках стенда КоБРа, шести сборках стенда БФС-1 и трех сборках стенда БФС-2. В статье представлены методика, результаты измерений и анализа эффекта реактивности Доплера образцов PuO_2 и NpO_2 на критических сборках БФС. Рис. 5, табл. 5, список лит. 5 назв.

УДК 612.014.481

Гуськова А.К. Медицинские последствия аварии на Чернобыльской АЭС. Основные итоги и нерешенные проблемы. — Атомная энергия, т. 113, вып. 3, с. 168—173.

Сопоставление неотложных решений и ретроспективный анализ оценок в ранний период аварии на Чернобыльской АЭС позволяют считать ранние меры адекватными объему доступной в тот период информации. В дальнейшем внесены лишь некоторые количественные уточнения, характеризующие последствия для здоровья. Оцениваются источники ошибок в интерпретации данных, порождающих социальную напряженность и не приносящих положительного эффекта для состояния физического и душевного здоровья участников аварийной ситуации.

В настоящей части статьи оцениваются последствия аварийного выброса для здоровья населения и принципы дальнейшего наблюдения за ними. Табл. 1, список лит. 17 назв.

УДК 504.054;574

Крышев И.И., Сазыкина Т.Г., Крышев А.И., Бобошко В.И., Францев В.Н., Ермакова М.А. Влияние радиоактивных выбросов уранодобывающего и перерабатывающего производств ОАО «ППГХО» на население и биоту. — Атомная энергия, т. 113, вып. 3, с. 173—177.

Представлены оценки безопасности и дозы облучения населения, а также объектов биоты от атмосферных выбросов ОАО «ППГХО». Показано, что в штатных условиях эксплуатации выбросы радиоактивных веществ не приводят к превышению гигиенических нормативов и экологических критериев обеспечения радиационной безопасности населения и объектов окружающей среды. Табл. 4, список лит. 10 назв.