



НИИТФА
РОСАТОМ

ISSN 0557-6733

ВОПРОСЫ АТОМНОЙ НАУКИ И ТЕХНИКИ

Серия:
Техническая физика и автоматизация

Выпуск 97

АО «НИИТФА»
2022

ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ «РОСАТОМ»

АО «РУСАТОМ ХЭЛСКЕА»

АО «НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ТЕХНИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ И АВТОМАТИЗАЦИИ»

**ВОПРОСЫ
АТОМНОЙ НАУКИ
И ТЕХНИКИ**

Серия:

**Техническая физика
и автоматизация**

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

Выпуск 97

Издаётся с 1967 г.

**Москва
2022**

УДК 621.039

Выпуск подготовлен АО «Научно-исследовательский институт
технической физики и автоматизации»

Редакционная коллегия

Балакирев П.В., Бондаренко Т.В., Бродский С.М. (заместитель главного редактора), Данилов В.Ф., Декопов А.С., Карташев Е.Р., Крылова Т.А., Кураченко Ю.А., Лобжанидзе Т.К., Масленников С.П., Патаракин О.О., Полозов С.М., Смирнов В.П., Третьякова О.П., Туманов М.В., Чебышов С.Б., Чуев А.Г., Шарков Г.Б., Шахпаронов В.М., Яковлев Е.И.

В научно-техническом сборнике «Вопросы атомной науки и техники. Серия: Техническая физика и автоматизация» публикуются материалы по следующим направлениям: радиационное приборостроение, неразрушающий контроль, радионуклидная энергетика, детекторы ионизирующего излучения и детектирующие системы, техника для медицинской диагностики и терапии, высокотемпературная сверхпроводимость, радиационные технологии, а также по общим вопросам применения аппаратуры и методов технической физики.

СОДЕРЖАНИЕ

Медицинская техника

Перспективы развития современных технологий брахитерапии с использованием отечественного оборудования Брико А.Н., Дыкина А.В., Осипов А.С., Титова В.А., Фишер Е.А., Харина А.А., Хмелинин Д.И.....	4
---	---

Неразрушающий контроль

Компенсация неравномерностей оптической плотности радиографических снимков осесимметричных кольцевых сварных стыков парогенераторов методом панорамной динамической щелевой радиографии Декопов А.С., Лобжанидзе Т.К., Лукьянов А.А. Михайлов С.В.	10
---	----

Аппаратура для атомной энергетики и ядерного топливного цикла

Исследование гамма-спектрометрического метода и разработка установки для измерения содержания ^{235}U в керметных топливных стержнях Бродский С.М.....	22
--	----

Медицинская техника

УДК 615.849 : 539.1.07

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ БРАХИТЕРАПИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОТЕЧЕСТВЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Брико А.Н.^{1,2}, Дыкина А.В.³, Осипов А.С.¹, Титова В.А.³, Фишер Е.А.¹,
Харина А.А.¹, Хмелинин Д.И.¹

¹АО «НИИТФА», г. Москва

²МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва

³ФГБУ «Российский научный центр рентгенорадиологии» Минздрава
России, г. Москва

В статье рассмотрены перспективы развития оборудования для брахитерапии в России на примере отечественного гамма-терапевтического комплекса «Брахиум» с радионуклидными источниками ⁶⁰Со и ¹⁹²Ir.

Ключевые слова: брахитерапия, отечественное оборудование, радиоактивный источник гамма-излучения, система дозиметрического планирования.

PROSPECTS OF MODERN BRACHYTHERAPY TECHNOLOGIES USING DOMESTIC EQUIPMENT DEVELOPMENT

Briko A.N.^{1,2}, Dykina A.V.³, Osipov A.S.¹, Titova V.A.³, Fisher E.A.¹,
Kharina A.A.¹, Khmelinin D.I.¹

¹JSC "NIITFA", Moscow

²Bauman Moscow State Technical University, Moscow

³Russian Scientific Center of Roentgenoradiology, Moscow

The article discusses the prospects for the development of equipment for brachytherapy in Russia on the example of the domestic gamma-therapeutic complex "Brachium" with radioactive sources of ⁶⁰Co and ¹⁹²Ir.

Keywords: brachytherapy, domestic equipment, radioactive source of gamma radiation, dosimetric planning system.

Импортозамещение – важный этап в развитии экономики России, как сказал наш президент В.В. Путин. Данное утверждение применимо так же и к медицинскому высокотехнологичному оборудованию. Без импортозамещения атомная медицина в России или исчезнет, или будет держаться на импортной «игле», что неизбежно приведет к повышению смертности, экономическим и политическим потерям. В рамках импортозамещения в столь важной и необходимой отрасли как атомная медицина предложен комплекс «Брахиум».

Гамма-терапевтический комплекс «Брахиум» предназначен для реализации процедур высокодозной брахитерапии и является современным инструментом отечественного производства. В аппарате учтены современные требования национальных и зарубежных стандартов, рекомендации международного медицинского онкологического сообщества, а также опыт российских специалистов, полученный за несколько десятилетий применения методики контактного облучения. По основным техническим характеристикам комплекс не уступает, а по ряду характеристик превосходит импортные аналоги. Комплекс укомплектован всеми необходимыми принадлежностями для реализации методик лечения онкологических заболеваний высокодозной брахитерапии (рисунок1). Аппарат является логическим продолжением серии аппаратов АГАТ для контактной лучевой терапии, разработанных и производимых АО «НИИТФА» с прошлого столетия [1].

Комплекс «Брахиум» предназначен для эксплуатации с одним тросовым закрытым радиоактивным источником, опционально возможен выбор источника между ^{60}Co и ^{192}Ir , что позволяет медицинской организации работать в привычном формате при использовании того или иного источника.



Рис. 1. Комплекс гамма-терапевтический для брахитерапии «Брахимум»

Также комплекс полностью совместим с современной российской системой 3D планирования Plan В (рисунок 2) и имеет в составе современную систему дозиметрического контроля, что реализует эффективность терапии путем оптимизации комбинации снижения дозой нагрузки на окружающие ткани и планирования облучения. Комплект аппликаторов, поставляемых с комплексом, позволяет проводить внутрисполостную и внутритканевую терапию, а также реализована возможность облучать опухоли, расположенные на поверхности тела.

В систему планирования внесена полная база данных аппликаторов, используемых с комплексом Брахиум.

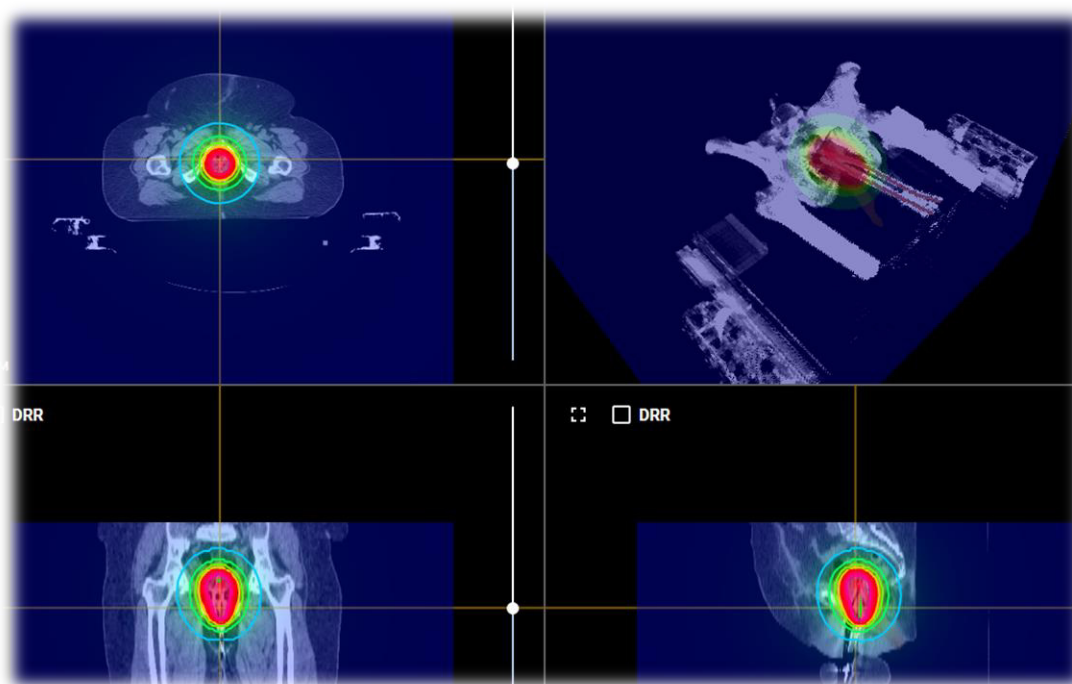


Рис. 2. Отечественная система трехмерного дозиметрического планирования контактной лучевой терапии Plan B

Для определения перспектив развития, модернизации и расширения каталога аппликаторов и принадлежностей комплекса для брахитерапии проведено дозиметрическое планирование и подготовлены планы лечения с использованием различных источников (^{60}Co и ^{192}Ir) для внутрисполостной терапии гинекологических локализаций на основе КТ и МРТ изображений. Трехмерные КТ и МРТ исследования анонимизированных пациентов для тестирования системы планирования были представлены ФГБУ «Российский научный центр рентгенорадиологии» Минздрава России.

Для демонстрации полученных результатов были подробно рассмотрены варианты планов лечения на основе кольпостата с втулками разных диаметров. Конструкция данного аппликатора позволяет подобрать индивидуальный вариант терапии пациента, максимально подходящий для данного клинического случая, путем лучшего контакта и покрытия области облучения, одновременно при этом уменьшая негативный эффект на

здоровые органы.

В результате проведенной работы были представлены возможности использования комплекса для брахитерапии «Брахиум», сделаны выводы об особенностях применения источников ^{60}Co и ^{192}Ir и различных аппликаторов в высокодозной брахитерапии, показаны перспективы развития современных технологий брахитерапии с использованием отечественного оборудования.

Контактная лучевая терапия остается важной частью борьбы с онкологическими заболеваниями как в России, так и в мире. Поэтому при разработке отечественного комплекса «Брахиум» учтены современные требования национальных и зарубежных стандартов, рекомендации международного медицинского онкологического сообщества, а также огромный опыт российских специалистов, полученный за несколько десятилетий применения методики контактного облучения [2].

В настоящих реалиях кроме ориентирования на современные требования к лечению для удовлетворения потребностей и признания профессиональной общественности при разработке и обслуживании медицинских изделий необходимо учитывать ряд уникальных для российского рынка особенностей. Также важным отличием в работе российских производителей от зарубежных аналогов является гибкость взаимодействия с медицинским сообществом, что сопровождается тонкой подстройкой под задачи конечного пользователя и условия функционирования лечебного учреждения [3].

В брахитерапии распространение индивидуально-ориентированного подхода лечения предполагает использование специальных методик, для реализации которых необходима разработка новых видов аппликаторов и принадлежностей, фиксирующих устройств, адаптация системы клинической дозиметрии. Аналогичная ситуация и с расширением функционала системы планирования под запрос пользователей.

Все вышеперечисленное показывает необходимость продолжения работ в сфере усовершенствования возможностей комплекса. Интеграция модернизированных компонентов в существующий технологический процесс, развитие инструментальной оснащённости и сервисной экосистемы на примере комплекса «Брахиум» производства АО «НИИТФА» позволяет надеяться в первую очередь на улучшение качества оказываемой медицинской помощи на оборудовании российского производства.

Приняты решения о дальнейшем развитии комплекса «Брахиум» в части необходимых принадлежностей, для оптимизации лечения пациентов с разными локализациями опухоли. Выбраны стратегии увеличения и расширения наполнения каталога комплектующих комплекса.

Список литературы

1. Титова В. А., Белле Т. С., Колосков С. А., Сумин А. В., Медведков А. М., Хетеев М. В. Контактная лучевая терапия с использованием отечественного комплекса АГАТ-ВТ. М.: Издательство «Аспект Пресс», 2018. 192 с.

2. Detection of brachytherapy seeds using 3D ultrasound// IEEE Journal. 2021. Т. 21. № 11. С. 12821–12839.

3. Солодкий В. А., Титова В. А., Белле Т. С., Колосков С. А., Сумин А. В., Медведков А. М., Хетеев М. В. Руководство для врачей и медицинских физиков: Научное издание. М.: Издательство «Аспект Пресс», 2018. 192 с.

Неразрушающий контроль

УДК 620.179.152

КОМПЕНСАЦИЯ НЕРАВНОМЕРНОСТЕЙ ОПТИЧЕСКОЙ ПЛОТНОСТИ РАДИОГРАФИЧЕСКИХ СНИМКОВ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ КОЛЬЦЕВЫХ СВАРНЫХ СТЫКОВ ПАРОГЕНЕРАТОРОВ МЕТОДОМ ПАНОРАМНОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ ЦЕЛЕВОЙ РАДИОГРАФИИ

Декопов А.С., Лобжанидзе Т.К., Лукьянов А.А. Михайлов С.В.
АО «НИИТФА», г. Москва

При радиографии осесимметричных кольцевых сварных стыков трубчатых элементов теплообменных аппаратов за одну экспозицию из аксиальной точки внутренней полости вварного трубчатого элемента возникает проблема компенсации неравномерностей оптической плотности снимка, обусловленных перепадами радиационных толщин профиля сварного стыка и узким динамическим диапазоном пленочных детекторов. Предложен метод динамической веернощелевой радиографии, позволяющий адаптивно нивелировать дисбаланс уровней регистрируемых детектором потоков проникающего γ -излучения с учетом изменений параметров радиационных толщин на основе формализованных аналитических закономерностей для различных зон сварного стыка.

Ключевые слова: радиографический метод; осесимметричные кольцевые сварные стыки; парогенератор; вварные трубчатые элементы, динамическая многощелевая радиография.

COMPENSATION OF IRREGULARITIES OF OPTICAL DENSITY OF RADIOGRAPHIC IMAGES OF AXISYMMETRIC CIRCULAR WELDED JOINTS OF STEAM GENERATORS BY PANORAMIC DYNAMIC SLOT RADIOGRAPHY

Dekopov A.S., Lobzhanidze T.K., Lukyanov A.A. , Mikhailov S.V.
JSC "NIITFA", Moscow

In the radiography of axisymmetric annular welded joints of tubular elements of heat exchangers in one exposure from the axial point of the inner cavity of the welded tubular element, the problem arises of compensating for irregularities in the optical density of the image, due to differences in the radiation thicknesses of the profile of the welded joint and a narrow dynamic

range of film detectors. A method of dynamic fan-slit radiography is proposed, which allows adaptively leveling the imbalance in the levels of penetrating γ -radiation fluxes recorded by the detector, taking into account changes in the parameters of radiation thicknesses based on formalized analytical patterns for various zones of the welded joint.

При неразрушающем контроле сварных соединений вварных трубчатых элементов тепломеханического оборудования, относящегося к изделиям первого класса безопасности, в мировой и отечественной практике преимущественно используют высокопроизводительный радиографический метод, обеспечивающий радиационное зондирование надмолекулярной структуры металла потоком проникающего излучения и регистрацию скрытого изображения пленочным детектором за одну экспозицию.

Выполненные в автоматизированном режиме кольцевые сварные стыки теплообменных аппаратов относятся к категории сложных для радиографии изделий.

В отечественной практике высокопроизводительного неразрушающего контроля множества идентичных кольцевых сварных швов сварных трубчатых элементов теплообменных аппаратов широко распространен метод фронтально-панорамного просвечивания из эквидистантно углубленной от внешнего кольцевого сварного стыка аксиальной точки его внутренней полости за одну экспозицию с применением острофокусных радионуклидных источников ионизирующего излучения на основе ^{192}Ir и ^{169}Yb [1, 2]. Регистрация информации о макроструктуре каждого сварного стыка при этом обеспечивается рентгеновской пленкой в светозащитной кассете, контактно укрепленной к торцовой поверхности вварного трубчатого элемента.

Технологическая схема радиографического контроля (рисунок 1) регламентирована унифицированной методикой контроля [3] и реализуется с использованием гамма-дефектоскопических установок серии «ДАР» [1], оснащенных дискретно перемещаемым из аксиального канала аппарата в зону контроля стержневым держателем источника в виде пенала, содержащего в средней части острофокусный радионуклидный излучатель.

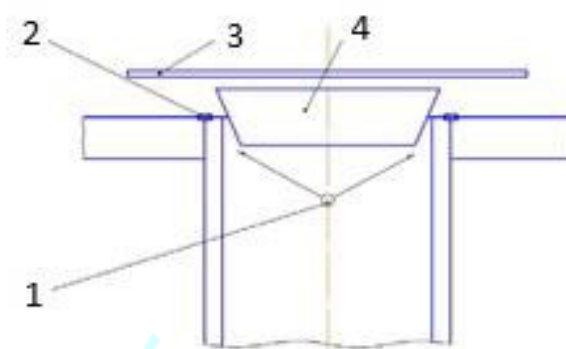


Рис.1. Схема радиографического контроля сварных соединений «труба-трубная доска»: 1 –излучатель; 2 – контролируемый сварной стык; 3 – детектор; 4 – компенсатор

Перемещения пенала с излучателем в зону контроля осуществляются через проходное отверстие дискообразной коробчатой кассеты из поливинилхлорида, содержащей перфорированный соответствующим аксиальным отверстием дискообразный пленочный детектор.

В международной практике неразрушающего контроля сварных стыков трубчатых элементов парогенератора в условиях изготовления и ремонта реализуется аналогичная технологии просвечивания за одну экспозицию излучателями на основе: ^{192}Ir ; ^{169}Yb ; ^{170}Tm [4] применением специализированной гамма-дефектоскопической аппаратуры «ГАММАМАТ[®] ВЗ».

Вследствие неравномерностей радиационных толщин профиля сварного стыка сварного трубчатого элемента и узкого динамического

диапазона пленочных детекторов одним из основных недостатков используемого метода радиографического контроля являются значительные перепады оптической плотности снимков, снижающие надежность выявления дефектов.

Согласно известной зависимости [5] оптическая плотность снимка S на линейном участке характеристической кривой пленки, пропорциональна логарифму экспозиционной дозы излучения:

$$S = \gamma \lg(P \cdot t) + K \quad (1)$$

или

$$S = 0,43 \gamma \ln(P \cdot t) + K , \quad (2)$$

где γ – коэффициент контрастности данного типа пленки; P – мощность экспозиционной дозы излучения, А/кг; t – время экспозиции, с; K – постоянная.

При прохождении потока проникающего излучения через барьер уровень фактической мощности экспозиционной дозы P согласно [5], изменяется в соответствии с экспоненциальным законом ослабления:

$$P = P_0 e^{-\mu x} , \quad (3)$$

где P_0 – мощность экспозиционной дозы (МЭД) первичного потока проникающего излучения в отсутствии поглотителя, А/кг; μ – линейный коэффициент ослабления излучения, см⁻¹; x – параметр радиационной толщины, см.

В этой связи расчетное значение оптической плотности снимка (S) при просвечивании барьера с радиационной толщиной (x) с учетом указанного закона ослабления МЭД может быть представлено в виде:

$$S = \gamma \lg(P_0 e^{-\mu x t}) , \quad (4)$$

или

$$S = 0,43 \gamma \ln(P_0 e^{-\mu x t}) . \quad (5)$$

Разночтения оптической плотности радиографического снимка (ΔS) различных участков контролируемого сварного стыка, отличающихся параметром радиационной толщины x , пропорциональны изменению МЭД ΔP и отображаются в виде:

$$\Delta S = 0,43 \gamma \frac{\Delta P}{P} . \quad (6)$$

При соблюдении регламентированной технологии контроля [3] нивелирование неравномерностей оптической плотности поля снимка представляется возможным [6, 7] в режиме динамической радиографии по участкам с учетом закономерностей зонального изменения радиационной толщины по профилю сварного стыка с использованием нескольких адресно и количественно распределенных дискретных номиналов пирамидальных потоков излучения поворотной веернощелевой системы сканирования.

Технологически контроль вварных трубчатых элементов в режиме динамической щелевой радиографии по участкам обеспечивается поворотным относительно геометрической оси цилиндрическим картриджом из радиационно-непрозрачного материала, перфорированного веерной системой пирамидальных коллимационных щелей. Ориентированные относительно сварного стыка в полярной системе координат сканирующие пирамидально-щелевые пучки излучения при их соответствующем количественном распределении адаптивно компенсируют дисбаланс уровней регистрируемых детектором потоков проникающего γ -излучения с учетом изменений параметров радиационных толщин на основе формализованных аналитических закономерностей для различных зон сварного стыка (рисунок 2).

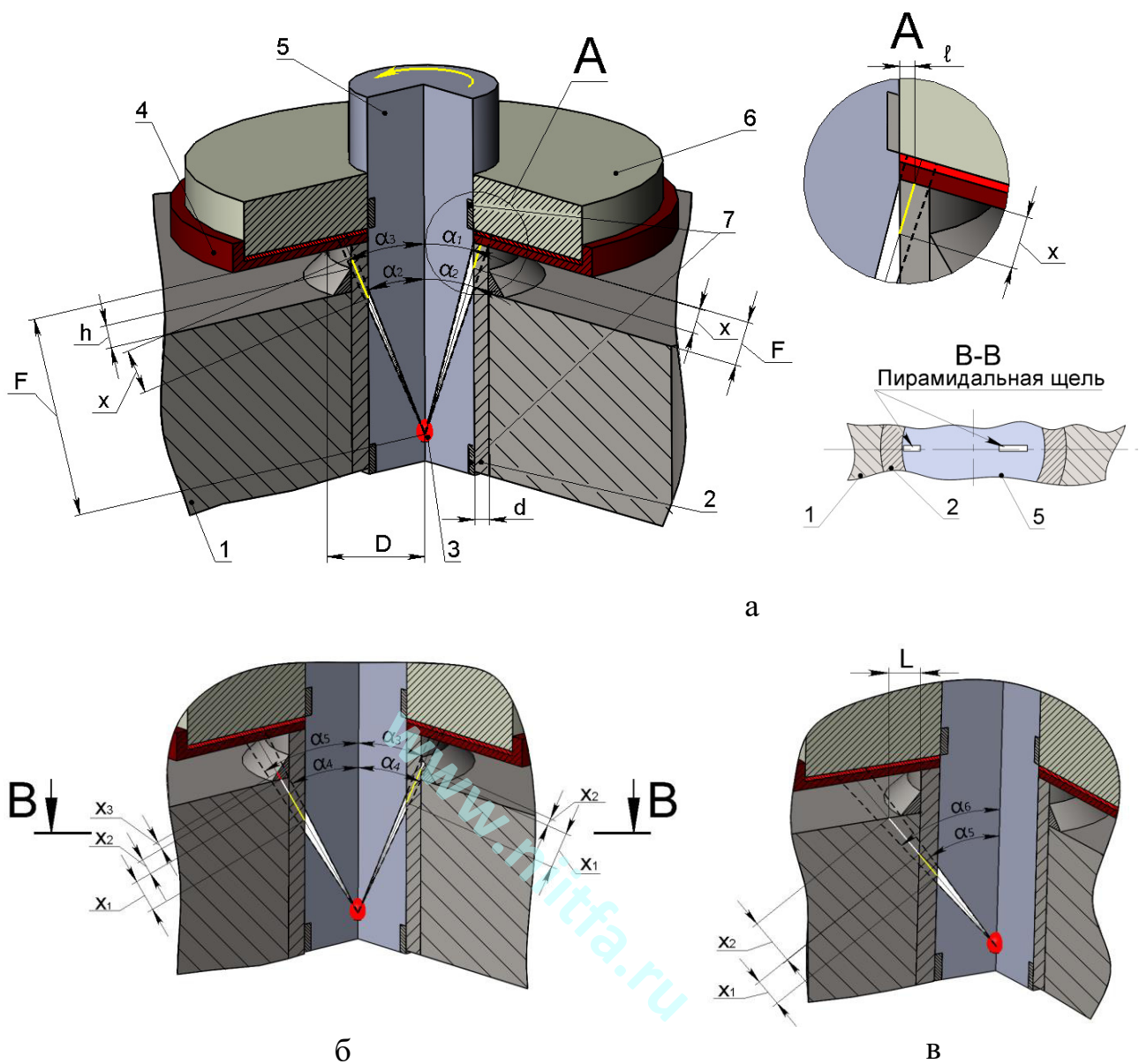


Рис. 2. Схема щелевого сканирующего просвечивания сварного стыка системой дискретных пирамидально-коллимированных пучков излучения в режиме динамической радиографии по 5 номиналам угловой направленности дискретных пирамидально-коллимированных пучков излучения в полярной системе координат: 1 – корпус объекта контроля; 2 – сварной трубчатый элемент; 3 – радионуклидный излучатель; 4 – кассета с пленочным детектором; 5 – поворотный картридж; 6 – блок биологической защиты; 7 – подшипники скольжения

Получение формализованных аналитических выражений радиационных толщин по профилю сварного шва реализуется авторами с принятием следующих допущений:

- пленочный детектор условно находится в непосредственном контакте с торцовой поверхностью вварного трубчатого элемента;
- сварные швы вварных трубчатых элементов выполняются в автоматизированном режиме сварки, идентичны в сечении по внешнему профилю, соответствующему в сечении равнобедренному прямоугольному треугольнику;
- параметр фокусного расстояния F для вариаций пирамидально-коллимированных потоков излучения принимается одинаковым.

Конструктивные параметры сварного стыка представлены на рисунке 2 (а, б, в):

F – расстояние (фокусное) от торца вварного трубчатого элемента (пленочного детектора) до центра острофокусного радионуклидного излучателя;

D – расстояние от оси до образующей поверхности вварного трубчатого элемента;

d – толщина оболочки вварного трубчатого элемента;

h – высота сварного шва;

H – расстояние от торца вварного трубчатого элемента (пленочного детектора) поверхности корпусного элемента объекта контроля (трубная доска);

x – параметр радиационной толщины;

α – параметр угловой направленности дискретных пирамидально-коллимированных пучков излучения в полярной системе координат;

l – параметр ограниченной термической стабильности макроструктуры основного металла вварного трубчатого элемента;

L – параметр ограниченной термической стабильности макроструктуры основного металла корпусного элемента.

Искомые параметры радиационных толщин x дискретных зон просвечивания сварного шва вварных трубчатых элементов определяются авторами для 5 зон (рисунок 2) согласно текущим усредненным параметрам угловой направленности α дискретных пирамидально-коллимированных пучков излучения в полярной системе координат применительно к каждой конкретной зоне профиля сварного шва следующими выражениями:

– для зоны № 1 профиля сварного шва (рисунок 2а) текущий параметр радиационных толщин x определяется выражением

$$x = \frac{F \cdot \operatorname{tg}(\alpha) - D + d}{\sin(\alpha)}$$

с учетом соотношений:

$$\operatorname{tg}(\alpha_1) = \frac{D - d}{F}$$

$$\operatorname{tg}(\alpha_2) = \frac{D}{F}$$

$$\operatorname{tg}(\alpha) = \frac{D - d + l}{F}$$

$$\sin(\alpha) + \frac{l}{x}$$

– для зоны № 2 профиля сварного шва (рисунок 2а) текущий параметр радиационной толщины x определяется выражением

$$x = \frac{d}{\sin(\alpha)}$$

с учетом соотношений:

$$\operatorname{tg}(\alpha_2) = \frac{D}{F}$$

$$\operatorname{tg}(\alpha_3) = \frac{D}{F - (H - h)}$$

$$\sin(\alpha) = \frac{d}{x};$$

– для зоны № 3 профиля сварного шва (рисунок 2б) текущий параметр радиационной толщины x определяется выражением

$$x = \frac{d}{\sin(\alpha)} + \frac{\left(F - \frac{D}{\operatorname{tg}(\alpha)}\right) - (H - h)}{\sin(180^\circ - 45^\circ - \alpha)} \cdot \sin(45^\circ)$$

с учетом соотношений:

$$\operatorname{tg}(\alpha_3) = \frac{D}{F - (H - h)}$$

$$\operatorname{tg}(\alpha_4) = \frac{D}{F - H}$$

$$\sin(\alpha) = \frac{d}{x_1}$$

$$\frac{x_2}{\sin(45^\circ)} = \frac{\left(F - \frac{D}{\operatorname{tg}(\alpha)}\right)}{\sin(180^\circ - 45^\circ - \alpha)}$$

$$x = x_1 + x_2$$

– для зоны № 4 профиля сварного шва (рисунок 2б) текущий параметр радиационной толщины x определяется выражением

$$x = \frac{d}{\sin(\alpha)} + \frac{F - H - \frac{D}{\operatorname{tg}(\alpha)}}{\cos(\alpha)} + \frac{\sin(45^\circ) \cdot (D + H - (F - H) \cdot \operatorname{tg}(\alpha))}{\sin(180^\circ - 45^\circ - 90^\circ + \alpha)}$$

с учетом соотношений:

$$\operatorname{tg}(\alpha_4) = \frac{D}{F - H}$$

$$\operatorname{tg}(\alpha_5) = \frac{D + h}{F - H}$$

$$\sin(\alpha) = \frac{d}{x_1}$$

$$\cos(\alpha) = \frac{F - H - \frac{D}{\operatorname{tg}(\alpha)}}{x_2}$$

$$\frac{x_3}{\sin(45^\circ)} = \frac{(D + H - (F - H) \cdot \operatorname{tg}(\alpha))}{\sin(180^\circ - 45^\circ - 90^\circ + \alpha)}$$

$$x = x_1 + x_2 + x_3;$$

– для зоны № 5 (рисунок 2в) текущий параметр радиационной толщины x определяется выражением

$$x = \frac{d}{\sin(\alpha)} + \frac{F - H - \frac{D}{\operatorname{tg}(\alpha)}}{\cos(\alpha)}$$

с учетом соотношений:

$$\operatorname{tg}(\alpha_5) = \frac{D + h}{F - H}$$

$$\operatorname{tg}(\alpha_6) = \frac{D - d + L}{F}$$

$$\sin(\alpha) = \frac{d}{x_1}$$

$$\cos(\alpha) = \frac{F - H - \frac{D}{\operatorname{tg}(\alpha)}}{x_2}$$

$$x = x_1 + x_2.$$

Компенсация дисбаланса уровней регистрируемых детектором потоков проникающего γ -излучения при прохождении барьеров переменной толщины, а также нивелирование неравномерностей оптической плотности снимка S применительно к конкретным конструктивным исполнениям сварных трубчатых элементов могут быть достигнуты за счет количества отдельных дискретных пирамидально-коллимированных пучков излучения с учетом известного [5] выражения (4) и системы формализованных аналитических закономерностей изменения радиационных толщин x в зависимости от угловой направленности α дискретных пирамидально-коллимированных пучков излучения в полярной системе координат:

$$x(\alpha) = \begin{cases} \frac{F \cdot \operatorname{tg}(\alpha) - D + d}{\sin(\alpha)}, & \arctg\left(\frac{D-d}{F}\right) \leq \alpha < \arctg\left(\frac{D}{F}\right) \\ \frac{d}{\sin(\alpha)}, & \arctg\left(\frac{D}{F}\right) \leq \alpha < \arctg\left(\frac{D}{F-(H-h)}\right) \\ \frac{d}{\sin(\alpha)} + \frac{\left(F - \frac{D}{\operatorname{tg}(\alpha)}\right) - (H-h)}{\sin(180^\circ - 45^\circ - \alpha)} \cdot \sin(45^\circ), & \arctg\left(\frac{D}{F-(H-h)}\right) \leq \alpha < \arctg\left(\frac{D}{F-H}\right) \\ \frac{d}{\sin(\alpha)} + \frac{F-H - \frac{D}{\operatorname{tg}(\alpha)}}{\cos(\alpha)} + \frac{\sin(45^\circ) \cdot (D+H - (F-H) \cdot \operatorname{tg}(\alpha))}{\sin(180^\circ - 45^\circ - 90^\circ + \alpha)}, & \arctg\left(\frac{D}{F-H}\right) \leq \alpha < \arctg\left(\frac{D+h}{F-H}\right) \\ \frac{d}{\sin(\alpha)} + F, & \arctg\left(\frac{D+h}{F-H}\right) \leq \alpha \end{cases}$$

В целях сокращения времени экспозиции поворотный цилиндрический картридж предполагает многократное периодическое тиражирование щелевой перфорации единичной сбалансированной системы сканирующих пирамидально-щелевых пучков излучения, адаптивно компенсирующей дисбаланс уровней регистрируемых детектором потоков проникающего γ -излучения.

Список литературы

1. Катюшин Э.А., Митенков Ф.М., Кондраненков Ю.Д., Фадеев А.К., Фирстов В.Г., Шилин А.В. Радиационный контроль сварных соединений теплообменных аппаратов ядерных энергетических установок. М.: Энергоатомиздат. 1985. 80 с.

2. Усачев Е.Ю., Усачев В.Е., Твердохлебов В.Н., Гнедин М.М., Галкин Д.И. Рентгенографический контроль кольцевых сварных швов в системе труба-трубная доска // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2011. № 11. С. 41–43.

3. ПНАЭГ-7-017-89. Унифицированная методика контроля основных материалов (полуфабрикатов), сварных соединений и наплавки оборудования и трубопроводов АЭУ. Радиографический контроль. М. 1990.

4. Zscherpel U., Alekseychuk O., Rost P., Schmid M., Spartiotis K., A. Warrikhoff. A new fully digital system for RT inspection of metal tube to tube sheet joints of heat exchangers // 17th World conference on nondestructive testing, 25–28 oct 2008. Shanghai, China.

5. Румянцев С.В. Радиационная дефектоскопия. М. Атомиздат, 1974. 510 с.

6. Декопов А.С., Михайлов С.В. Лобжанидзе Т.К. Способ радиоизотопной дефектоскопии и схема устройства динамической целевой радиографии надмолекулярной структуры металла кольцевых сварных стыков вварных трубчатых элементов. Патент РФ № 2683997, 25.04.2018.

7. Декопов А.С., Михайлов С.В. Лобжанидзе Т.К. Способ и схема устройства радиографического контроля макроструктуры осесимметричных кольцевых сварных стыков вварных трубчатых элементов. Патент РФ № 2700364, 06.12.2018.

Аппаратура для атомной энергетики и ядерного топливного цикла

УДК 621.039.544.34 : 543.429.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ГАММА-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОГО МЕТОДА И РАЗРАБОТКА УСТАНОВКИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ^{235}U В КЕРМЕТНЫХ ТОПЛИВНЫХ СТЕРЖНЯХ

Бродский С.М.
АО «НИИТФА», г. Москва

Метод измерения содержания ^{235}U по собственному гамма- и рентгеновскому излучению был применен для анализа керметных стержней, представляющих собой гранулы диоксида урана, распределенные в матрице из сплава циркония. Разработан алгоритм и проведены расчеты выходов естественного фотонного излучения для керметного стержня с гетерогенной структурой. Получены оценки влияния размеров гранул на выходы гамма-излучения ^{235}U с энергией 185,7 кэВ и рентгеновского излучения урана с энергией 98,43 кэВ в зависимости от массовой доли урана в образце. Предложен способ компенсации погрешности измерения содержания ^{235}U в топливном стержне, вызванной изменением толщины оболочки. Разработана экспериментальная установка, содержащая два гамма-спектрометра с детекторами NaI(Tl). Проведены измерения метрологических характеристик спектрометров.

Ключевые слова: керметный стержень, гетерогенная структура, диоксид урана, сцинтилляционная гамма-спектрометрия, детектор NaI(Tl), измерение содержания ^{235}U .

INVESTIGATION OF THE GAMMA-SPECTROMETRIC METHOD AND DEVELOPMENT OF THE EXPERIMENTAL SETUP FOR MEASURING THE CONTENT OF ^{235}U IN CERMET FUEL RODS

Brodsky S.M.
JSC "NIITFA", Moscow

The method of measuring the ^{235}U content by its own gamma and X-ray radiation was used to analyze cermet rods, which are uranium dioxide granules distributed in a zirconium alloy matrix. An algorithm has been developed and calculations of the yields of natural photon radiation for a cermet rod with a heterogeneous structure have been carried out. Estimates are obtained of the influence of granules sizes on the yields of ^{235}U gamma radiation with an energy of 185.7 keV and uranium X-ray radiation with an energy of 98.43 keV

depending on the mass fraction of uranium in the sample. A method is proposed for compensating the error in measuring the ^{235}U content in a fuel rod caused by a change in the thickness of the cladding. An experimental setup has been developed containing two gamma spectrometers with NaI(Tl) detectors. The metrological characteristics of the spectrometers were measured.

Keywords: cermet rod, heterogeneous structure, uranium dioxide, scintillation gamma spectrometry. NaI(Tl) detector, ^{235}U content measurement.

Введение

Пассивный гамма-спектрометрический метод неразрушающего контроля широко применяется для определения содержания ^{235}U в ядерном топливе [1–3]. Типичная процедура измерения содержания ^{235}U , основанная на принципе измерителя обогащения [4], заключается в регистрации с помощью сцинтилляционного спектрометра естественного гамма-излучения ^{235}U с энергией 185,7 кэВ с ограниченной поверхности однородного образца заданной толщины. При выполнении этих условий чистая скорость счета в пике с указанной энергией прямо пропорциональна содержанию ^{235}U . Массовую долю C_{235} изотопа ^{235}U можно представить в виде линейной комбинации полной скорости счета N_1 в участке спектра, соответствующем пику с энергией 185,7 кэВ, и полной скорости счета N_2 в участке спектра с более высокой энергией, выбранном для учета вклада фона комптоновского рассеяния в скорость счета N_1 ,

$$C_{235} = aN_1 + bN_2, \quad (1)$$

где a и b – постоянные коэффициенты, определяемые при градуировке спектрометра.

Для проведения градуировки необходимы по крайней мере три стандартных образца с различным содержанием ^{235}U и одинаковыми остальными параметрами, которые должны быть идентичны параметрам анализируемых образцов. В том случае, когда анализируемые и стандартные образцы имеют различный элементный состав матрицы или различную толщину оболочки, поправки на ослабление излучения в образце или в его оболочке должны быть учтены. Оценить величину

поправок можно расчетным путем [5] или с помощью измерения отношения интенсивностей двух линий гамма-излучения одного из изотопов урана [6]. Реализация последнего способа учета поправок требует применения детектора с высоким энергетическим разрешением и длительного времени измерения для обеспечения адекватной статистической точности.

При использовании сцинтилляционных детекторов с ФЭУ, подверженных сильному влиянию изменений температуры окружающей среды, применяют методы стабилизации спектра, основанные на регулировании коэффициента усиления спектрометра для компенсации изменения положения известного пика полного поглощения, постоянно присутствующего в спектре. Например, современный сцинтилляционный спектрометр с детектором NaI(Tl), имеющий цифровую стабилизацию спектра, позволяет проводить анализ образцов в форме таблетки диаметром 20 мм из диоксида урана с относительной среднеквадратической погрешностью 0,83 % при обогащении урана равном 20 % [3]. При этом следует отметить, что анализ проводился описанным выше методом двух окон, другие, более сложные способы обработки спектров, основанные на аппроксимации формы пика полного поглощения, не приводят к повышению точности измерений.

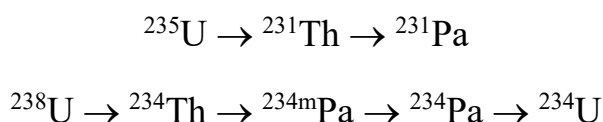
В настоящей работе рассматриваются вопросы разработки метода и создания прототипа установки пассивного контроля содержания ^{235}U в топливных стержнях и твэлах нового поколения на основе керметного топлива с матричной структурой, предназначенных для реакторов атомных станций малой мощности (АСММ). Керметные твэлы имеют повышенные эксплуатационные характеристики (прежде всего по выгоранию и геометрической стабильности) и надежность, а использование ядерного топлива обогащением меньше 19,5% по ^{235}U устраняет основное препятствие, ограничивающее поставку АСММ в другие страны. Увеличение ресурса с одновременным обеспечением требований по

обогащению ядерного топлива позволит повысить экономические показатели каждой АСММ по сравнению с зарубежными аналогами [7].

Физические основы метода

Выходы фотонного излучения для гомогенных образцов

Фотонное излучение радионуклидов, содержащихся в урановом ядерном топливе, используемом при изготовлении керметных ТВЭЛОВ, образуется преимущественно в результате естественного радиоактивного распада изотопов ^{235}U и ^{238}U по следующим схемам:



Радиоактивное равновесие в приведенных схемах распада можно считать установившимся (99,9 %) по истечению 240 дней с момента химического выделения урана.

Фотонное излучение в диапазоне энергий от 80 до 210 кэВ, сопровождающее процессы распада указанных изотопов урана, в зависимости от его происхождения можно разделить на три группы.

К первой группе относятся линии гамма- и рентгеновского излучения ^{235}U и его дочерних радионуклидов: ^{231}Th , ^{231}Pa .

Ко второй группе относятся линии гамма- и рентгеновского излучения ^{238}U и его дочерних продуктов: ^{234}Th , ^{234}Pa .

Третью группу образуют линии характеристического рентгеновского излучения урана с энергиями 93,8 кэВ ($K\alpha_3$), 94,6 кэВ ($K\alpha_2$) и 98,4 кэВ ($K\alpha_1$), которое образуется в результате двух различных процессов: распада ^{234}Pa в ^{234}U и возбуждения характеристического рентгеновского излучения атомов урана в образце собственным фотонным излучением (рентгеновской флуоресценции).

В таблице 1 приведены вероятности эмиссии перечисленных выше линий гамма- и рентгеновского излучения [8, 9].

Таблица 1. Характеристики фотонного излучения ^{235}U и ^{238}U

Вид излучения	Энергия, кэВ	Вероятность эмиссии, %		
		^{235}U	^{238}U	Флуоресценция
γ (^{231}Th)	81,23	0,84±0,04		
γ (^{231}Th)	82,09	0,35±0,02		
γ (^{234}Th)	83,25		0,052±0,08	
γ (^{231}Th)	84,21	7,17±0,20		
γ (^{231}Th)	89,95	0,97±0,05		
X (Th $K\alpha_2$)	89,96	3,17±0,08		
X (Pa $K\alpha_2$)	92,29	0,451±0,036	0,0255±0,0030	
γ (^{234}Th)	92,37		2,52±0,06	
γ (^{234}Th)	92,79		2,50±0,06	
γ (^{231}Th)	93,05	0,050±0,010		
X (Th $K\alpha_1$)	93,35	5,22±0,14		
X (U $K\alpha_3$)	93,84		0,60±0,05	0,15±0,05*
X (U $K\alpha_2$)	94,65		2,42±0,03	61,2±0,2*
X (Pa $K\alpha_1$)	95,89	0,776±0,043	0,0433±0,0035	
γ (^{235}U)	96,35	0,047±0,014		
X (U $K\alpha_1$)	98,43		3,97±0,04	100*
γ (^{231}Th)	99,35	0,14±0,03		
γ (^{231}Th)	102,3	0,39±0,02		
X (Th $K\beta_1$)	105,6	1,17±0,05		
γ (^{235}U)	109,2	1,80±0,06		
X (U $K\beta_{1,3,5}$)	111,0		1,61±0,02	39,6±0,6*
γ (^{234}Th)	112,8		0,29±0,04	
X (U $K\beta_{2,4}$)	114,5		0,49±0,03	10,1±0,8*
γ (^{235}U)	143,8	10,9±0,2		
γ (^{235}U)	163,3	5,09±0,05		
γ (^{235}U)	182,6	0,43±0,05		
γ (^{235}U)	185,7	57,2±0,2		
γ (^{235}U)	194,9	0,61±0,02		
γ (^{235}U)	202,1	1,06±0,04		
γ (^{235}U)	205,3	5,04±0,05		

* Значения даны относительно линии U $K\alpha_1$ (100)

Для образца, имеющего «бесконечную» толщину, поправка на самопоглощение обратно пропорциональна массовому коэффициенту ослабления фотонного излучения веществом образца, и отношение выхода I_i произвольной линии i , испускаемой в результате распада ^{235}U , к выходу I_0 линии с энергией 185,7 кэВ равно

$$\frac{I_i}{I_0} = \frac{y_i \mu_0}{y_0 \mu_i}, \quad (2)$$

где индекс 0 указывает, что данная величина относится к линии с энергией 185,7 кэВ.

Учитывая, что удельная активность изотопа урана обратно пропорциональна его периоду полураспада и атомной массе, аналогичное отношение для произвольной линии i , испускаемой при распаде ^{238}U , имеет вид

$$\frac{I_i}{I_0} = \frac{y_i \mu_0}{y_0 \mu_i} \frac{T_{1/2}^{235}}{T_{1/2}^{238}} \frac{235}{238} \frac{m_{238}}{m_{235}}, \quad (3)$$

где m_{235} и m_{238} – массы изотопов ^{235}U и ^{238}U ; $T_{1/2}^{235}$ и $T_{1/2}^{238}$ – периоды полураспада ^{235}U и ^{238}U равные $7,038 \cdot 10^8$ лет и $4,47 \cdot 10^9$ лет соответственно [9].

Выход флуоресцентного рентгеновского излучения урана, которое образуется за счет возбуждения атомов урана в образце собственным фотонным излучением, в основном, гамма-излучением ^{235}U с энергией выше энергии К-края поглощения урана, пропорционален содержанию ^{235}U . Значение коэффициента пропорциональности, определенное экспериментально с помощью полупроводникового CdTe детектора для таблеток из диоксида урана с обогащением 17 % и 21 %, равно $0,231 \pm 0,006$ для линии U $K\alpha_1$. Коэффициенты пропорциональности для других линий К-серии флуоресцентного излучения урана были рассчитаны с использованием данных об относительных выходах, указанных в

таблице 1, и массовых коэффициентов ослабления излучения в диоксиде урана [10]. Полученное значение полного коэффициента пропорциональности составляет 0,547.

Низкое энергетическое разрешение сцинтилляционного детектора не позволяет разделить линии фотонного излучения в диапазоне энергий от 80 до 115 кэВ, и они образуют в спектре один пик полного поглощения энергии. Суммарный относительный выход фотонного излучения для этих линий может быть рассчитан с помощью формул (2) и (3) и экспериментальных данных для флуоресцентного излучения. На рисунке 1 построена зависимость относительного выхода фотонного излучения в области энергий 80–115 кэВ от массовой доли ^{235}U в смеси изотопов урана, которая хорошо аппроксимируется полиномом второй степени. На рисунке показаны аппроксимирующая функция и коэффициент детерминации, характеризующий качество аппроксимации. Уменьшение выхода с возрастанием обогащения объясняется снижением вклада от линий гамма- и рентгеновского излучения ^{238}U и его дочерних нуклидов.

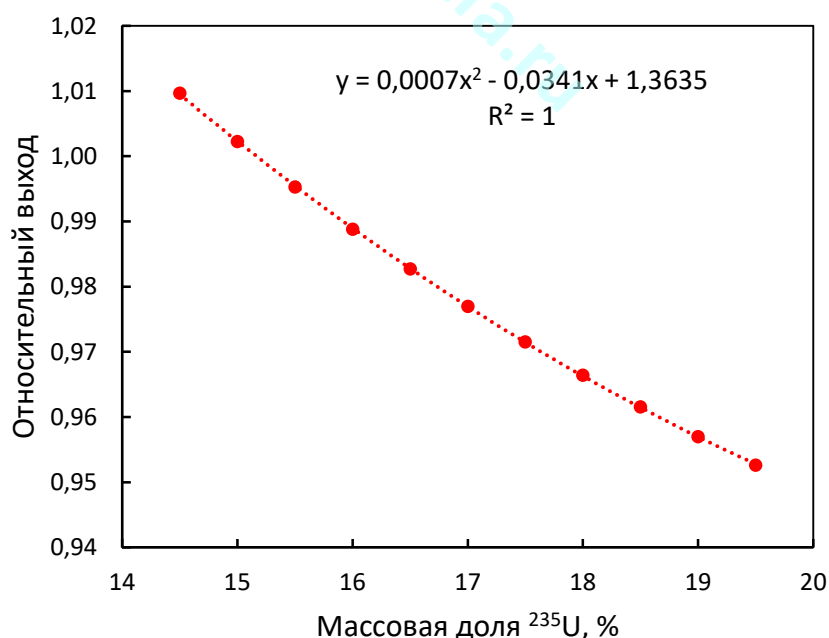


Рис. 1. Зависимость относительного выхода фотонного излучения в диапазоне энергий 80–115 кэВ от содержания ^{235}U

Влияние гетерогенной структуры и толщины оболочки образца на выходы фотонного излучения

Разработанный в НИИ НПО «Луч» керметный ТВЭЛ [7] отличается от известных ТВЭЛов дисперсионного типа тем, что

- тепловыделяющий сердечник, набираемый из керметных стержней высотой 50 мм, имеет матричную структуру, исключаящую контакты между пористыми топливными частицами размером ~ 500 мкм, при объемной доле ядерного топлива в композиции ~ 75 %;
- в качестве матрицы используется материал на основе ZrNb сплава;
- между оболочкой и сердечником располагается подслоя из материала типа силумин.

Керметный стержень имеет гетерогенную структуру и представляет собой гранулы диоксида урана диаметром от 400 до 550 мкм, распределенные в матрице из сплава циркония (массовая доля ниобия в сплаве от 1 до 2,5 %), с оболочкой из сплава циркония Э110 (массовая доля ниобия в сплаве от 0,9 до 1,1 %) толщиной 100 – 200 мкм. Содержание урана в стержне от 4 до 8 г, массовая доля ^{235}U в смеси изотопов урана от 15 до 19,7 %. Стержень имеет диаметр 5,65 мм.

Чтобы оценить влияние гетерогенной структуры топливного стержня на выходы фотонного излучения изотопов урана, будем считать, что все гранулы диоксида урана обладают одинаковыми размерами и формой и распределены в матрице из циркония в виде слоев, следующих друг за другом вдоль плоской поверхности образца. Предположим, что гранулы имеют простую форму (сфера или куб) и распределены случайным образом в слоях с толщиной равной их характерному линейному размеру. Выход фотонного излучения с энергией E для такого гетерогенного образца может быть представлен в виде

$$I_{\text{гет}} = \sum_{i=0}^m I_d(E) \cdot f \cdot a_i, \quad (4)$$

где $I_d(E)$ – выход излучения с энергией E для гомогенного слоя диоксида урана толщиной d ; f – доля площади, занимаемой частицами в каждом слое; a_i – ослабление излучения от слоя i в слоях между слоем i и поверхностью образца; $m + 1$ – число слоев в образце.

Выход $I_d(E)$ фотонного излучения с энергией E для гомогенного слоя диоксида урана толщиной d равен

$$I_d(E) = \frac{k A_V S}{\mu_{\Gamma} \rho_{\Gamma}} [1 - \exp(-\mu_{\Gamma} \rho_{\Gamma} d)], \quad (5)$$

где k – постоянный коэффициент, определяемый геометрией измерений; A_V – объемная активность диоксида урана в $\text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-3}$; S – площадь поверхности образца в см^2 ; μ_{Γ} и ρ_{Γ} – массовый коэффициент ослабления излучения с энергией E в материале гранул (диоксид урана) в $\text{см}^2 \cdot \text{г}^{-1}$ и его плотность в $\text{г} \cdot \text{см}^3$.

Ослабление излучения от слоя i расположенными выше слоями равно

$$a_i = [f \cdot \exp(-\mu_{\Gamma} \rho_{\Gamma} d) + (1 - f) \cdot \exp(-\mu_{\text{м}} \rho_{\text{м}} d)]^{i-1}, \quad (6)$$

где $\mu_{\text{м}}$ и $\rho_{\text{м}}$ – массовый коэффициент ослабления излучения с энергией E в материале матрицы (цирконий) в $\text{см}^2 \cdot \text{г}^{-1}$ и его плотность в $\text{г} \cdot \text{см}^3$.

Выход $I_{\text{гет}}$ фотонного излучения удобно представить в виде относительной величины, нормированной на выход I_{∞} излучения с энергией E для образца «бесконечной» толщины с однородным распределением диоксида урана в матрице из циркония с такой же массовой долей диоксида урана, как и в гетерогенном образце,

$$I_{\infty} = \frac{k A_V S}{\mu_{\Gamma} \rho_{\Gamma} C_{\Gamma} + \mu_{\text{м}} \rho_{\text{м}} (1 - C_{\Gamma})}, \quad (7)$$

где C_{Γ} – массовая доля диоксида урана в образце.

При проведении расчетов выходов фотонного излучения число слоев $m+1$ выбирали так, чтобы их суммарная толщина была близка к диаметру топливного стержня. На рисунке 2 показана зависимость относительного выхода $I_{\text{гет}}/I_{\infty}$ гамма-излучения с энергией 185,7 кэВ от содержания урана в стержне. При постоянном значении обогащения урана относительный выход прямо пропорционален содержанию ^{235}U . При изменении массы урана от 4 до 8 г расчетные значения $I_{\text{гет}}/I_{\infty}$ для линии $\text{U } K\alpha_1$ примерно на 4 % выше в начале и практически совпадают в конце диапазона по сравнению с линией 185,7 кэВ.

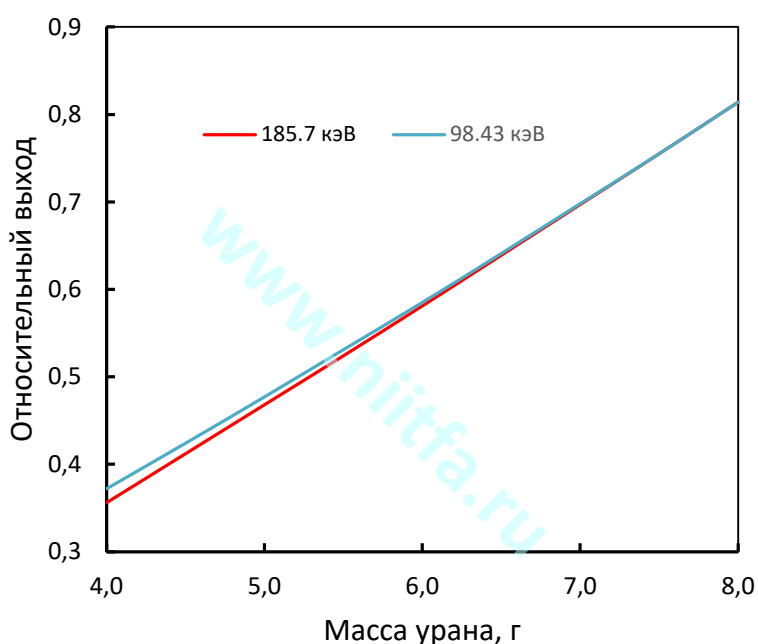


Рис.2. Зависимость относительного выхода гамма-излучения с энергией 185,7 и 93,48 кэВ от содержания урана, рассчитанная для гетерогенного образца с гранулами диаметром 0,5 мм

Выходы фотонного излучения зависят также от изменения размеров гранул в пределах топливного стержня. Количественная оценка этой зависимости может быть получена с помощью параметра

$$\delta_d = 2 \frac{I_{\text{гет}}(d_{\min}) - I_{\text{гет}}(d_{\max})}{I_{\text{гет}}(d_{\min}) + I_{\text{гет}}(d_{\max})}, \quad (8)$$

характеризующего относительную разность выходов $I_{\text{гер}}(d_{\text{min}})$ и $I_{\text{гер}}(d_{\text{max}})$, рассчитанных для минимального d_{min} и максимального d_{max} диаметров гранул. Результаты расчетов представлены в виде графиков на рисунке 3.

Ослабление фотонного излучения с энергией E оболочкой топливного стержня может быть рассчитано по формуле

$$T_E = \exp(-\mu_E \rho t), \quad (9)$$

где μ_E – массовый коэффициент ослабления излучения с энергией E материалом оболочки стержня; ρ и t – плотность и толщина оболочки.

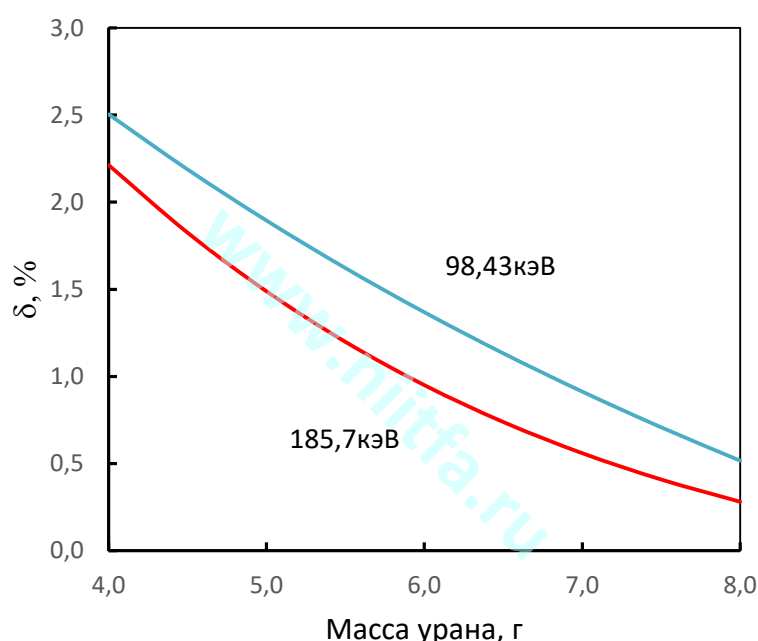


Рис. 3. Относительная разность выходов фотонного излучения, рассчитанных для минимального и максимального диаметров гранул равных 0,4 и 0,55 мм, как функция содержания урана

Расчеты показывают, что при изменении толщины оболочки от 100 до 200 мкм относительное изменение выхода гамма-излучения с энергией 185,7 кэВ составляет 1,5 %.

Поправка на изменение толщины оболочки может быть введена путем измерения отношения I_1/I_2 выходов двух линий фотонного излучения с энергиями E_1 и E_2 , прошедшего через оболочку, толщина

которой неизвестна. Отношение I_1/I_2 , измеренное для оболочки толщиной t , деленное на отношение I_1/I_2 , измеренное при отсутствии оболочки ($t=0$), обозначим R_t , тогда

$$R_t = \exp(\mu_2 \rho t - \mu_1 \rho t), \quad (10)$$

где μ_1 и μ_2 – массовые коэффициенты ослабления для соответствующих линий фотонного излучения.

Подставляя толщину t , найденную из выражения (10), в формулу (9), получим

$$T_E = R_t^{\frac{\mu_E}{\mu_1 - \mu_2}}, \quad (11)$$

Из соотношения (11) следует, что для минимизации погрешности измерения T_E необходимо, чтобы значение показателя степени было как можно меньше. Для этого энергии линий фотонного излучения должны существенно отличаться. Например, при $E=E_2=185,7$ кэВ и $E_1=98,43$ кэВ значение показателя степени составляет 0,328. На рисунке 4 показана зависимость ослабления линии гамма-излучения с энергией 185,7 кэВ от параметра R_t , рассчитанного по формуле (10) для указанных выше значений E_1 и E_2 при изменении толщины циркониевой оболочки в пределах 100–200 мкм. Полученная зависимость аппроксимируется линейной функцией, коэффициенты которой могут быть легко определены с помощью образцов стержней с заданной толщиной оболочки.

Разработанный способ учета изменения толщины оболочки реализован в составе программы обработки спектрометрической информации при создании программного обеспечения для экспериментальной установки пассивного контроля содержания ^{235}U .

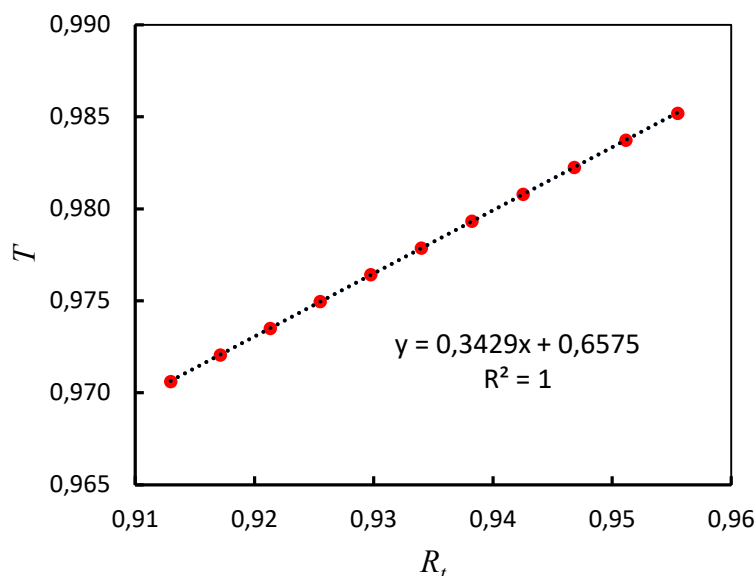


Рис. 4. Ослабление гамма-излучения с энергией 185,7 кэВ циркониевой оболочкой толщиной 100-200 мкм как функция параметра R_t

Экспериментальные исследования

Сцинтилляционный спектрометр фотонного излучения

При контроле содержания ^{235}U в топливных стержнях и твэлах регистрация фотонного излучения изотопов урана и их дочерних радионуклидов, содержащихся в ядерном топливе, должна осуществляться с помощью детекторов, имеющих достаточно большие размеры, чтобы обеспечивать геометрию измерений, близкую к 4π , высокую эффективность регистрации и, по возможности, хорошее энергетическое разрешение. Таким требованиям в наибольшей степени удовлетворяют сцинтилляционные детекторы из йодида натрия, активированного таллием, NaI(Tl). Большой атомный номер йода в кристалле NaI(Tl) обеспечивает высокую эффективность регистрации гамма-излучения. Энергетическое разрешение для кристалла диаметром 76 мм и длиной 76 мм составляет обычно около 7 % на линии гамма-излучения ^{137}Cs с энергией 662 кэВ и несколько хуже при других размерах кристалла. Время высвечивания сцинтиллятора NaI(Tl) приближенно равно 0,23 мкс. Типичные

зарядочувствительные предусилители преобразуют такие световые вспышки в электрические импульсы с временем нарастания около 0,5 мкс.

Для прототипа установки пассивного контроля выбран детектор NaI(Tl) с кристаллом диаметром 51 мм и длиной 51 мм, установленным вместе с ФЭУ в едином цилиндрическом корпусе, снабженном 14-штырьковым разъемом для подключения к электронному блоку обработки электрических сигналов (см. рисунок 5). Выпускаемый фирмой Saint-Gobain Crystals (США) данный тип детектора имеет одни из самых лучших технических характеристик по сравнению с аналогами. В частности, измеренное энергетическое разрешение на линии 662 кэВ для двух детекторов, предназначенных для установки пассивного контроля, составляет 6,0 % и 6,3 %.



Рис. 5. Внешний вид сцинтилляционного детектора NaI(Tl) с ФЭУ

Детектор подключается к электронному блоку digiBASE фирмы ORTEC (США). Блок digiBASE включает миниатюрный предусилитель с цифровой обработкой электрических сигналов, поступающих от ФЭУ, источник высокого напряжения для питания ФЭУ, и многоканальный анализатор. Все компоненты размещены в легком малогабаритном корпусе, изображенном на рисунке 6. Спектрометр имеет малое энергопотребление, не требует специального источника питания и подключается к персональному компьютеру через порт USB.



Рис. 6. Электронный блок digiBASE

Пакет прикладных программ обеспечивает графический интерфейс пользователя для выполнения всех операций, необходимых для настройки параметров накопления информации, накопления данных и сохранения спектров.

Детекторы NaI(Tl) имеют коэффициент преобразования энергии фотонов в амплитуду электрического сигнала, чувствительный к изменениям температуры окружающей среды и магнитных полей. Блок digiBASE снабжен стабилизатором коэффициента усиления, позволяющим в значительной степени компенсировать указанную зависимость от температуры. Непрерывная регулировка коэффициента усиления в автоматическом режиме поддерживает положение центра пика в спектре фотонного излучения в заданной позиции, обеспечивая очень высокую стабильность спектрометра.

Имеется встроенная электронная схема стабилизации коэффициента усиления и смещения. Стабилизация осуществляется по заданному реперному пику в спектре, положением которого многоканальный анализатор может управлять таким образом, что если дрейф будет обнаружен, то коэффициент усиления и смещение системы автоматически подстраиваются для компенсации дрейфа. Стабилизатор может корректировать смещение в пределах от 0 до 10 % от полного диапазона и

использует полный диапазон регулировки плавного коэффициента усиления для коррекции погрешности коэффициента усиления.

Специальное программное обеспечение – эмулятор многоканального анализатора MAESTRO-32 выполняет все функции управления блоком digiBASE и вывода информации. Предусмотрена возможность использования эмулятора MAESTRO-32 совместно с программами, разрабатываемыми пользователями digiBASE для собственных нужд.

Конструкция экспериментальной установки

В состав разработанной в НИИТФА экспериментальной установки для измерения содержания ^{235}U в керметных стержнях входят:

- измерительное устройство;
- устройство перемещения контролируемого изделия в измерительную позицию;
- управляющий компьютер;
- контроллер управления исполнительными механизмами.

Структурная схема установки показана на рисунке 7.

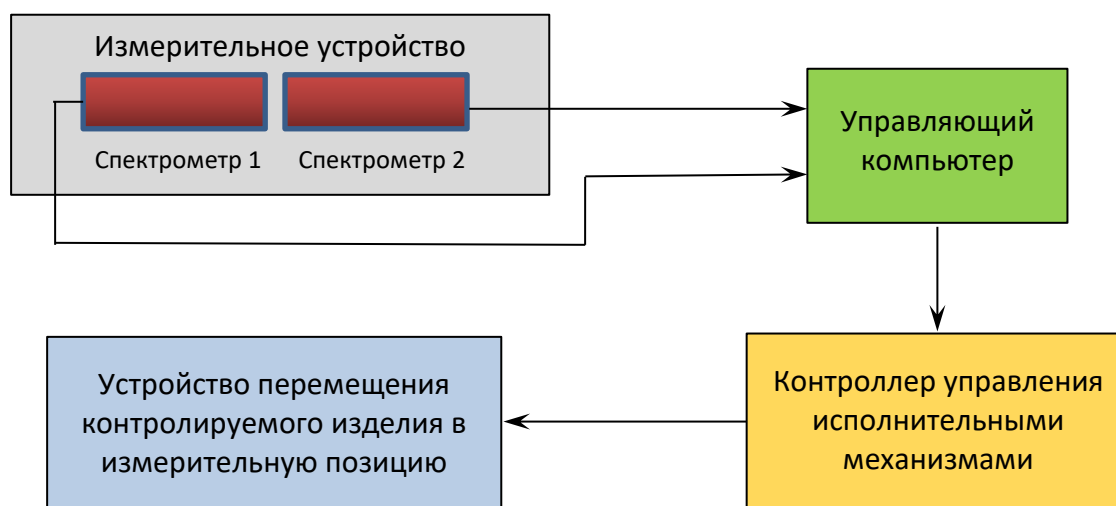


Рис. 7. Структурная схема экспериментальной установки

Измерительное устройство предназначено для регистрации естественного фотонного излучения радионуклидов, содержащихся в топливных стержнях, набора спектров фотонного излучения и передачи информации в управляющий компьютер. Измерительное устройство содержит два спектрометра, каждый из которых состоит из детектора NaI(Tl) и электронного блока digiBASE. Устройство перемещения предназначено для подачи контролируемых керметных стержней в измерительную позицию в процессе их сканирования. Управляющий компьютер производит обработку информации, поступающей от спектрометров, и на основе ее анализа передает сигналы на контроллер, управляющий исполнительными механизмами устройства перемещения.

На рисунке 8 приведена фотография измерительного устройства, разработанного для проведения предварительных испытаний установки и уточнения отдельных конструктивных решений.



Рис. 8. Измерительное устройство экспериментальной установки

Два спектрометра установлены соосно таким образом, что чувствительные поверхности детекторов обращены друг к другу и

расстояние между ними составляет 8 мм. Детекторы размещены внутри защиты, выполненной из вольфрама в форме цилиндрической трубы с толщиной стенки равной 12 мм. В стенке защиты имеются два отверстия, через одно из которых помещенный в специальный канал керметный стержень с помощью толкателя вводится в измерительную позицию внутри тонкой алюминиевой трубки, расположенной соосно отверстию в защите. После завершения измерения с помощью выталкивателя, проходящего через другое отверстие в защите, стержень выводится из измерительной позиции.

Измерения спектрометрических параметров

Измерения параметров экспериментальной установки проводили с использованием имитатора керметного стержня, представляющего собой таблетку из диоксида урана, выполненную в форме цилиндра диаметром 5,9 мм и высотой 12 мм. Массовая доля изотопа ^{235}U составляла 17 %, что приблизительно соответствует середине диапазона содержания изотопа в керметном стержне. На рисунке 9 изображен спектр фотонного излучения в области энергий от 5 до 250 кэВ, измеренный с имитатором керметного стержня.

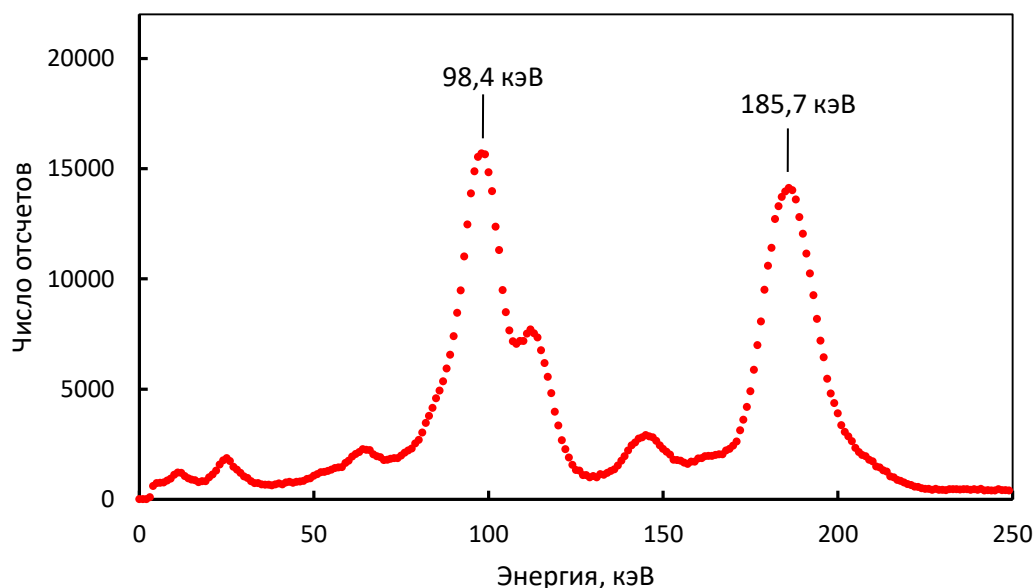


Рис. 9. Спектр фотонного излучения от имитатора керметного стержня

В спектре имеются два основных пика полного поглощения с энергиями 98,4 кэВ (линия рентгеновского излучения $U K\alpha_1$) и 185,7 кэВ (линия гамма-излучения U). Энергии всех линий фотонного излучения, присутствующих в спектре, приведены в таблице 1.

Для проверки стабильности работы спектрометра проводили непрерывные измерения спектра по живому времени в течение 8 часов. В каждом спектре определяли положение центра пика с энергией 185,7 кэВ аппроксимацией функцией Гаусса участка спектра в области его центра. На рисунке 10 показаны изменения положения центра пика при отключенной и включенной системе стабилизации коэффициента усиления и смещения спектрометрического тракта по пику с энергией 185,7 кэВ. Коэффициент вариации положения этого пика составляет 0,017 %.

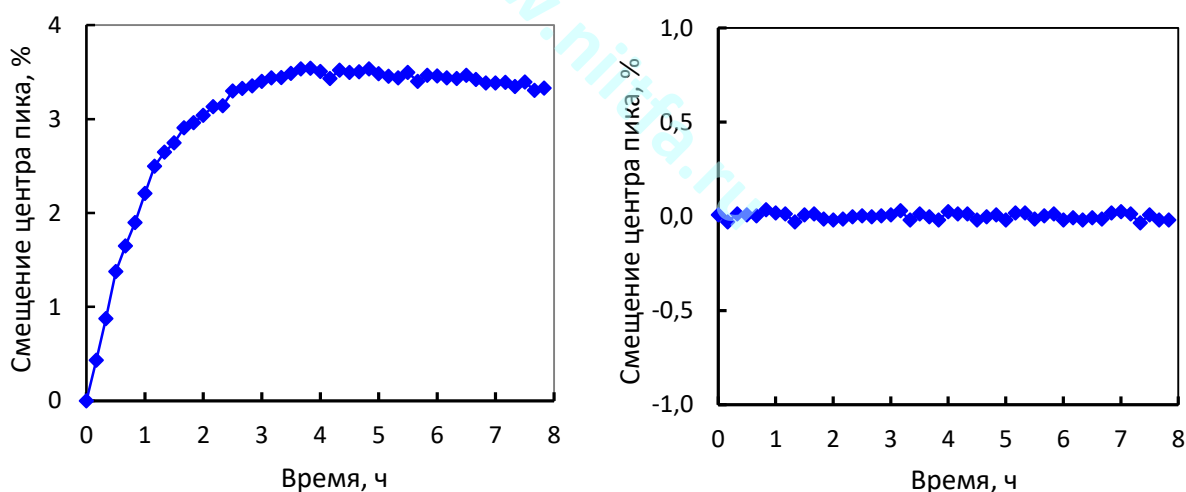


Рис. 10. Смещение центра пика с энергией 185,7 кэВ за 8 часов непрерывной работы без стабилизации (слева) и со стабилизацией (справа)

На рисунках 11 и 12 для каждого детектора показаны изменения площади пика (числа отсчетов в пике) с энергией 185,7 кэВ при периодических измерениях спектров по живому времени 300 с с включенной системой цифровой стабилизации, а также приведены средние значения и среднеквадратические отклонения числа отсчетов.

Учитывая, что число отсчетов N в пике подчиняется нормальному закону распределения со стандартным отклонением $\sigma = \sqrt{N}$, сравнение с полученными значениями среднеквадратических отклонений показывает, что нестабильность скорости счета спектрометров пренебрежимо мала.

Заключение

Проведены теоретические исследования по применению пассивного метода измерения содержания ^{235}U в топливных стержнях на основе керметного топлива. Разработан метод расчета выходов естественного



Рис. 11. Изменение площади пика с энергией 185,7 кэВ за 8 часов непрерывной работы для детектора 1



Рис. 12. Изменение площади пика с энергией 185,7 кэВ за 8 часов непрерывной работы для детектора 2

фотонного излучения для гетерогенного образца, содержащего частицы диоксида урана, распределенные в металлической матрице. Получены оценки влияния размеров частиц на изменение выходов гамма-излучения ^{235}U с энергией 185,7 кэВ и рентгеновского излучения урана с энергией 98,43 кэВ в зависимости от массовой доли урана в образце. Предложен способ компенсации погрешности измерения содержания ^{235}U в топливном стержне, вызванной изменением толщины оболочки.

Проведен анализ экспериментальных данных и технических характеристик сцинтилляционных спектрометров фотонного излучения, направленный на обеспечение минимальной погрешности измерений и повышение производительности анализа.

Разработаны принципы построения и структурная схема установки пассивного контроля содержания ^{235}U . Изготовлена экспериментальная установка, содержащая два спектрометра с детекторами NaI(Tl), подключенных к персональному компьютеру.

Проведены измерения спектрометрических характеристик экспериментальной установки, которые показали высокую абсолютную эффективность регистрации фотонного излучения за счет обеспечения геометрии измерений близкой к 4π , и низкую нестабильность амплитуды сигнала во времени равную 0,017 % за 8 часов непрерывной работы.

Установка использована в НИИ НПО «Луч» для отработки методов контроля технологических параметров керметных стержней при горячем изостатическом прессовании [10].

Список литературы

1. Reilly D., Ensslin N., Smith Jr., H. Passive nondestructive assay of nuclear materials. US Nuclear Regulatory Commission, NUREG/CR-5550 / Washington, DC, USA, 1991. P. 195–219.

2. Tam N. C., Zsigrai J., Lakosi L., Jozsef E., Safar J. Non-destructive analysis of low-enriched and natural U samples by γ -spectrometry // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2001. Vol. 515. P. 644–650.

3. Mortreau, P. Berndt R. Determination of the uranium enrichment with the NaIGEM code // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2004. Vol. 530. P. 559-567.

4. Reilly, T. D. The enrichment meter – a simple method for measuring isotopic enrichment. Los Alamos Scientific Laboratory report LA-4605-MS. 1970. P. 19.

5. Mortreau P., Berndt R. Attenuation of a non-parallel beam of gamma radiation by thick shielding—application to the determination of the ^{235}U enrichment with NaI detectors // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2005. Vol. 550. P. 675–690.

6. McClelland P. Lewis V. Measurement Good Practice Guide No. 34. Radiometric Non-Destructive Assay. National Physical Laboratory, TW11 0LW. Teddington, Middlesex, UK. 2003. P. 41.

7. Гаврилин С.С., Денискин В.П., Наливаев В.И., Федик И.И. Керметный ТВЭЛ для АСММ с повышенными характеристиками и безопасностью. Доклад на 7 Международном форуме «Топливо-энергетический комплекс России», 10–12 апреля 2007 г. ФГУП «НИИ НПО «Луч».

8. Morel J., Clark D. Influence of nuclear data on uranium enrichment results obtained by X $K\alpha$ spectral region analysis // Applied Radiation and Isotopes. 2002. Vol. 56. P. 85–91.

9. Ruellan H., Lepy M.C., Etcheverry M., Plagnard J., Morel J. A new spectra processing code applied to the analysis of ^{235}U and ^{238}U in the 60 to 200 keV energy range // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 1996. Vol. 369. P. 651–656.

10. Гаврилин С.С., Ермаченко В.П., Стафеева Н.В. Расчетно-экспериментальные методы контроля технологических параметров

керметных стержней при горячем изостатическом прессовании // Атомная энергия. 2014. Т. 117. Вып. 3. С. 172–174.

www.niitfa.ru

www.niitfa.ru

ВОПРОСЫ АТОМНОЙ НАУКИ И ТЕХНИКИ
Серия: Техническая физика и автоматизация

Выпуск 97

Ответственный за выпуск
Туманов М.В.

Научное редактирование
Бродский С.М.

Адрес редакции: 115230, Москва, Варшавское шоссе, 46, АО «НИИТФА»
E-mail: vant@niitfa.ru
Ответственный секретарь Подколзина О.А. Тел. +7(495)730-80-10 доб. 48-80

Подписано в печать 30.03.2023	Усл. печ. л. 2,8	Формат 60x90/8
Офсетная печать	Статей 3	Уч. -изд. л. 2,6
Тираж 100 экз.		Заказ

Оригинал-макет подготовлен в АО «НИИТФА»

www.niitfa.ru