

РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТКИ И ОПЫТНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ГАММА-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ С ЭЛЕКТРООХЛАЖДАЕМЫМИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМИ ДЕТЕКТОРАМИ ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЯ МАССОВОЙ ДОЛИ УРАНА-235 В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОТОКАХ ГЕКСАФТОРИДА УРАНА РАЗДЕЛИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

В.Э. Залецкий, В.Ю. Овчинников, А.В.Сапрыгин

*Открытое акционерное общество
«Уральский электрохимический комбинат»
624130, г. Новоуральск Свердловской обл., ул. Дзержинского, 2
czl@ueip.ru*

Поступила в редакцию 12 ноября 2010 г.

В статье изложены результаты разработки и опытной эксплуатации экспериментального гамма-спектрометра для оперативного контроля массовой доли урана-235 в технологических потоках гексафторида урана, созданного на базе электроохлаждаемого полупроводникового детектора высокого разрешения и цифровой гамма-спектрометрической системы, в условиях разделительного производства ОАО «УЭХК». Показаны преимущества разработанного гамма-спектрометра и примененных спектрометрических методов обработки информации перед традиционно используемыми в технологических целях сцинтилляционными гамма-спектрометрами.

Ключевые слова: разделительное производство, гексафторид урана, массовая доля урана-235, гамма-спектрометрия, полупроводниковый детектор

Сапрыгин Александр Викторович – профессор, д.т.н., начальник Центральной заводской лаборатории ОАО «УЭХК».

Область научных интересов: организация систем аналитического контроля при производстве обогащенного урана для атомной энергетики, физические и химические методы анализа урановых материалов.

Автор/соавтор более 100 публикаций.

Овчинников Валерий Юрьевич – начальник химико-аналитической лаборатории ЦЗЛ ОАО «УЭХК».

Область научных интересов: радиометрические методы анализа, аналитические методы контроля производства обогащенного гексафторида урана.

Автор/соавтор более 20 публикаций.

Залецкий Виктор Эдуардович – ведущий инженер-радиометрист ЦЗЛ ОАО «УЭХК».

Область научных интересов: радиометрические и спектрометрические методы анализа урана и его соединений, разработка радиометрического аналитического оборудования.

Автор/соавтор более 20 публикаций.

Введение

На разделительных заводах ОАО «УЭХК» технологическая цепочка имеет сложную многополочную структуру, позволяющую производить одновременную наработку товарного гексафторида урана (ГФУ) различных степеней обогащения по урану-235 из различных видов сырья. Кроме того, в связи с большим количеством номиналов и Заказчиков (например, в

2009 году низкообогащенный уран для атомных электростанций с массовой долей урана-235 в диапазоне 1,90 ÷ 4,95 %, всего – 26 номиналов, был поставлен шестнадцати Заказчикам) в течение года приходится часто осуществлять технологические переходы (перестроения технологической цепочки и изменения режимов её работы). Для оперативного управления процессом получения низкообогащенного урана про-

водится постоянный контроль значений массовой доли урана-235 во всех технологических потоках гексафторида урана разделительного каскада, который осуществляется с помощью масс-спектрометров и (до недавнего времени) сцинтилляционных радиометров типа ИМД [1]. ИМД и масс-спектрометры являются составной частью автоматизированной системы управления технологической схемой (АСУТС).

Принцип работы приборов ИМД, использовавшихся в АСУТС более 30 лет, заключался в отдельной регистрации интенсивности собственного гамма-излучения урана-235 с энергией 185,7 кэВ, сопровождающего его альфа-распад, и характеристического рентгеновского излучения всего урана со средней энергией 98 кэВ, возбуждаемого внешним радиоактивным источником (РАИ) селен-75. Наличие в приборе, устанавливаемом на технологическом потоке, двух параллельно работающих спектрометрических трактов (двух камер) и РАИ позволяло определять массовую долю урана-235 как отношение интенсивности линии 185,7 кэВ к интенсивности линии 98 кэВ.

За время работы приборы ИМД неоднократно модернизировались для повышения надежности эксплуатации, эффективности работы и упрощения конструкции, в частности, в настоящее время на ОАО «УЭХК» взамен ИМД введены в эксплуатацию измерители массовой доли на базе сцинтилляционных гамма-спектрометров типа СКГ (спектрометр контроля гамма). СКГ представляет собой модернизированный ИМД без радиоизотопного источника селен-75, оснащенный комплектом измерителей температуры и давления, системой динамической стабилизации энергетической шкалы, а также системой сбора и передачи информации [2, 3]. Общее содержание урана в измерительной камере определяется из уравнения Менделеева-Клапейрона расчетным способом, для чего проводятся независимые измерения температуры и давления ГФУ в камере. Содержание урана-235, как и в ИМД, определяется путем регистрации собственного гамма-излучения урана-235 с энергией 185,7 кэВ.

Однако, аппаратная часть СКГ и его алгоритм работы, как и у приборов ИМД, не позволяют корректно учитывать вклад мешающих излучений при определении интенсивности собственного гамма-излучения урана-235 (особенно даже при незначительном содержании в ГФУ радиоактивных примесей) [1, 2]. Поэтому, в рамках дальнейшего развития спектрометрических приборов технологического контроля, направленного на аппаратную и программную реализацию учета всех фоновых составляющих под основным аналитическим пиком собственного гамма-излучения урана-235, увеличение

надежности и стабильности работы оборудования, в Центральной заводской лаборатории (ЦЗЛ) ОАО «УЭХК» проведен ряд работ по исследованию возможности применения спектрометрических методов обработки информации с использованием измерительных систем на базе блоков детектирования низкого и высокого разрешения [4].

Результаты исследований по применению сцинтилляционной гамма-спектрометрии с независимым способом стабилизации характеристики преобразования блока детектирования в гамма-датчике приборов типа СКГ показали невозможность использования спектрометрических методов регистрации и обработки информации с использованием систем низкого разрешения на основе сцинтилляционных детекторов для решения задач технологического контроля степени обогащения урана-235 с приемлемой погрешностью.

Для проведения исследований по использованию систем высокого разрешения на основе полупроводниковых детекторов (ППД) из особо чистого германия была изготовлена специальная камера из нержавеющей стали, позволяющая размещать полупроводниковый детектор в её «эффективном» центре для увеличения эффективности регистрации гамма-излучения от ГФУ, находящегося в камере; выбраны оптимальные параметры цифровой гамма-спектрометрической системы; получены и обработаны экспериментальные данные для ГФУ различного обогащения и давления, как с мешающими излучениями, так и без них. Результаты проведенных исследований подтвердили возможность использования цифровых гамма-спектрометрических систем на основе ППД в составе технологических приборов для осуществления оперативного контроля массовой доли урана-235 в потоках ГФУ с погрешностью не хуже, чем у ИМД и корректно учитывающих влияние мешающих излучений на определение чистой площади пика урана-235 с энергией 185,7 кэВ.

Основываясь на положительных результатах проведенных исследований, была разработана конструкция экспериментального гамма-спектрометра для контроля массовой доли урана-235 в технологических потоках ГФУ в цехах разделительного производства. Разработанный способ определения массовой доли урана-235 в ГФУ с использованием спектрометрических методов обработки информации и система для его реализации защищены патентом РФ [5].

В настоящей работе приведены результаты опытной эксплуатации разработанного экспериментального гамма-спектрометра с электроохлаждаемым полупроводниковым детектором высокого разрешения и цифровой гамма-спектрометрической системой для опе-

ративного контроля массовой доли урана-235 в технологических потоках ГФУ в условиях разделительных цехов ОАО «УЭХК».

Экспериментальная установка

Структурная схема разработанной в ЦЗЛ ОАО «УЭХК» экспериментальной установки на базе гамма-спектрометра с полупроводниковым детектором приведена на рис. 1.

В состав установки входят: газовый блок (1), предназначенный для подключения измерительной камеры (2) к технологическим потокам гексафторида урана непосредственно в цехах разделительного производства и отбора проб ГФУ для калибровки гамма-спектрометра; спектрометрический тракт, состоящий из электроохлаждаемого полупроводникового детектора из особо чистого германия типа GC2518 фирмы «Canberra» (3) с предварительным усилителем (4) и контроллером электроохлаждаемого блока типа CryoPulse (5), блоков питания и формирования сигналов в составе цифрового анализатора спектра типа Lynx фирмы «Canberra» (6).

В качестве датчика температуры (7) использовался микропроцессорный термопреобразователь ТСПУ Метран-276МП с диапазоном измеряемых температур 0...+50 °С и относительной погрешностью измерения 0,15 %. Для оцифровки выходного сигнала датчика температуры и передачи значений температуры в персональный компьютер (9) использовался модуль аналогового ввода ADAM-4012 (8) и плата связи PCI 1602, установленная в компьютере.

В качестве датчика давления (10) был применен абсолютный емкостной датчик давления Baratron 626AX12MDD производства фирмы MKS-Instruments с диапазоном измеряемых давлений 0...100 мм.рт.ст. и относительной погрешностью измерения 0,15 %. Датчик давления преобразует измеряемое давление в унифицированный пропорциональный сигнал постоянного напряжения, который подается на блок индикации и связи PR-4000A (11). Блок PR-4000A обеспечивает питание датчика давления, отображение измеряемого давления, а также оцифровку показаний и передачу их в персональный компьютер по интерфейсу RS-232.

Весь гамма-спектрометр вместе с измерительной камерой помещается в специальный шкаф, который устанавливается непосредственно в цехе вблизи контролируемого технологического потока ГФУ. Размещение отдельных блоков гамма-спектрометра и измерительной камеры в шкафу видно из рис. 2. Вверху слева в шкафу видны трубки для подсоединения газового блока.

Принципиальная схема газового блока приведена на рис. 3. При проведении данных исследований использовался газовый блок, разработанный для измерителей массовой доли типа ИМД и СКГ.

Газовый блок позволяет производить откачку ГФУ из измерительной камеры (ИК), обеспечивает режим постоянного протока ГФУ из контролируемого потока через ИК, заполнение измерительной камеры ГФУ при различных давлениях, предварительную очистку ГФУ от аэрозолей на специальных фильтрах, отбор различ-

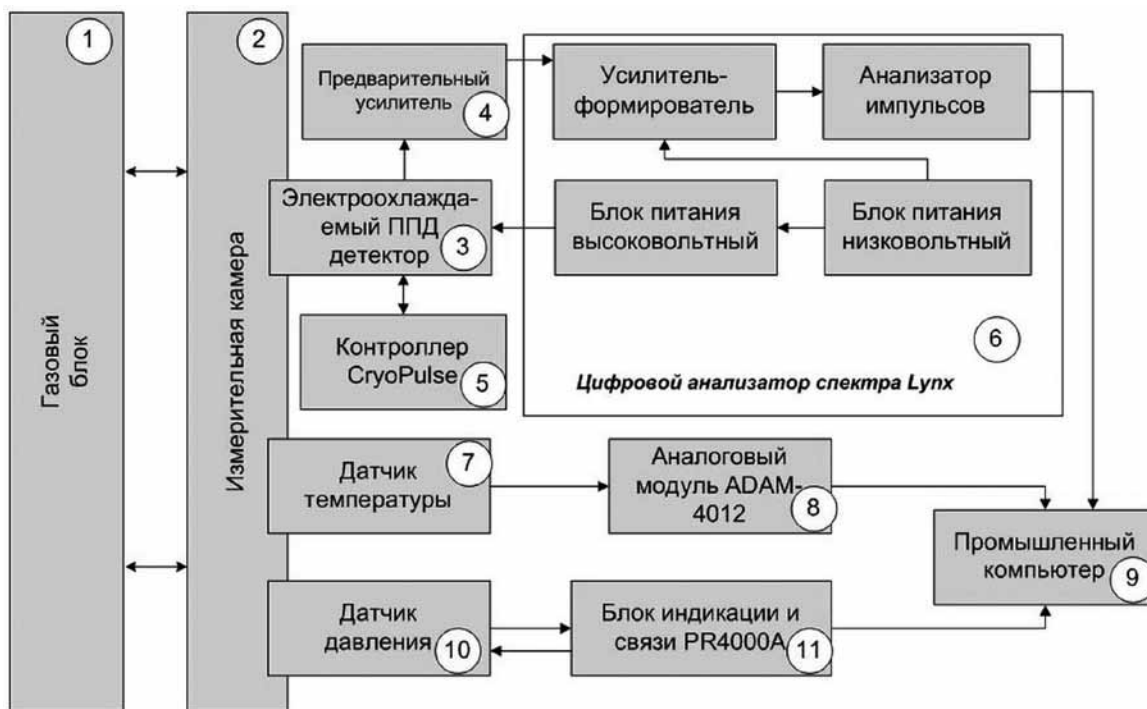


Рис. 1. Структурная схема экспериментального гамма-спектрометра



Рис. 2. Расположение блоков гамма-спектрометра

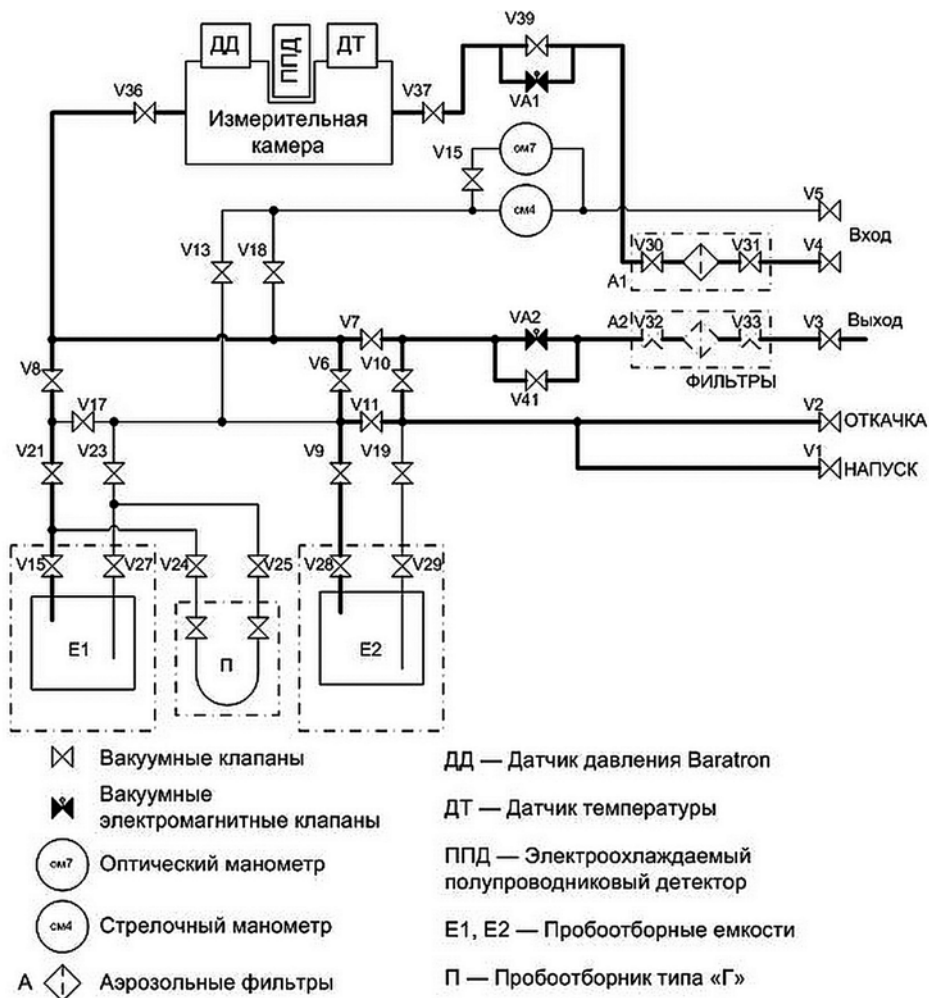


Рис. 3. Принципиальная схема газового блока

ных проб ГФУ для сравнительных измерений и калибровки.

Для регистрации и обработки спектров гамма-излучения с целью извлечения из них полезной информации, а именно – чистой площади пика урана-235 с энергией 185,7 кэВ были установлены оптимальные параметры спектрометрического тракта и условия обработки спектров, полученные нами в ходе проведения предварительных испытаний. Для работы на потоке низкообогащенного ГФУ были установлены следующие параметры:

- энергетическая область регистрации спектра гамма-излучения – $5 \div 2000$ МэВ;
- число каналов АЦП – 16384;
- значение параметра «LT trim» (параметр, отвечающий за оптимизацию работы корректора живого времени) – 50;
- область пика 179,4-188,2 кэВ, несимметричная относительно центроиды пика урана-235 с энергией 185,7 кэВ;
- метод расчета фоновой подложки под пиком – «ступенька»;
- ширина фоновых областей слева и справа от пика – 20 каналов (энергетическая ширина канала 0,126 кэВ);
- определение площади пика – путем поканального суммирования по области пика.

На рис. 4 приведен фрагмент спектра гамма-излучения, зарегистрированного на технологическом потоке от гексафторида низкообогащенного урана, с пиком гамма-излучения урана-235 с энергией 185,7 кэВ, наглядно демонстрирующий выбранные параметры обработки спектров.

Основные расчетные формулы и алгоритмы калибровки гамма-спектрометра

С помощью гамма-спектрометра с ППД реализован разработанный в ЦЗЛ и на приборном заводе Уральского электрохимического комбината способ определения массовой доли урана-235 [5, 6], заключающийся в измерении в выбранном временном интервале интенсивности гамма-излучения урана-235, температуры и давления газовой фазы гексафторида урана, непрерывно протекающего через измерительную камеру и расчете массовой доли изотопа уран-235 по формуле

$$C_5 = \alpha \cdot I_\gamma \cdot T / p, \quad (1)$$

где C_5 – массовая доля изотопа уран-235 в газовой фазе гексафторида урана, %; α – градуировочный коэффициент; I_γ – скорость счета гамма-квантов от урана-235 с энергией 185,7 кэВ, c^{-1} ; T – абсолютная температура гексафторида урана в камере, К; p – давление гексафторида урана в камере, мм.рт.ст.

Для определения градуировочного коэффициента α в измерительную камеру напускают при рабочем давлении ГФУ из контролируемого потока и отсекают от коммуникаций. Проводят регистрацию не менее 20 спектров гамма-излучения от ГФУ с одновременным измерением давления и температуры ГФУ и после проведения этого цикла измерений из измерительной камеры прибора с помощью газового блока отбирают пробу для масс-спектрометрического определения массовой доли урана-235. Градуи-

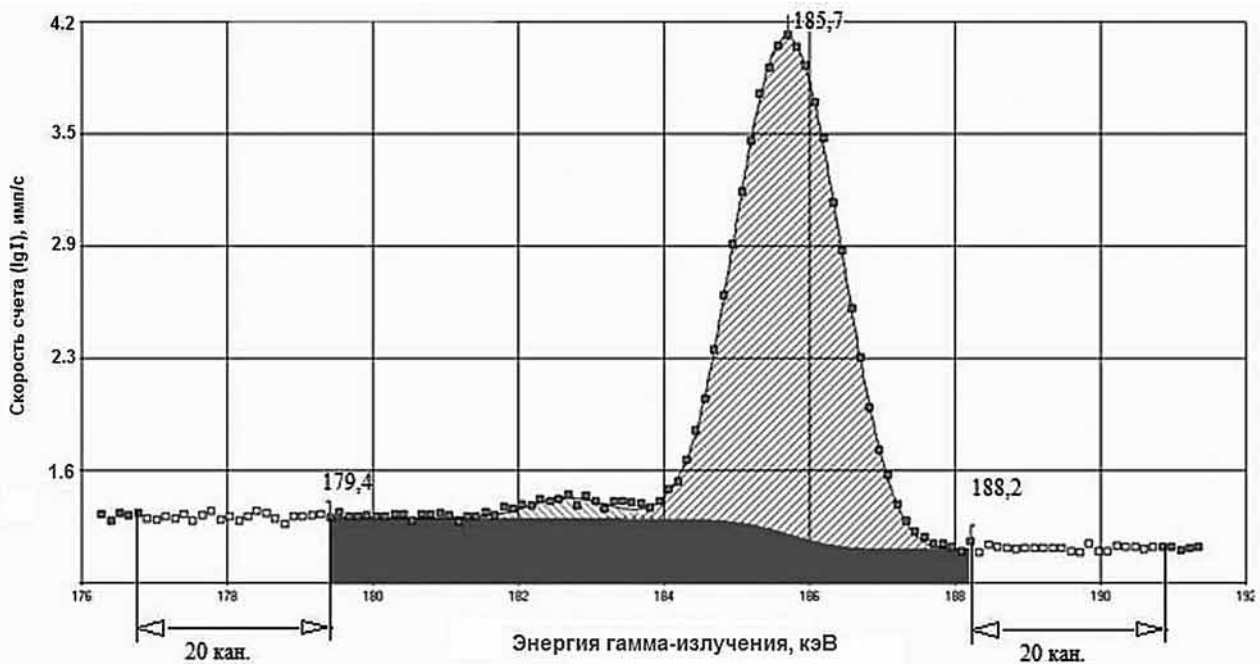


Рис. 4. Фрагмент спектра гамма-излучения с основным аналитическим пиком урана-235, полученный на технологическом потоке от низкообогащенного ГФУ

ровочный коэффициент α рассчитывают по результатам масс-спектрометрических измерений по формуле

$$\alpha = \frac{C_s \cdot p}{I_\gamma \cdot T}, \quad (2)$$

где C_s – массовая доля изотопа уран-235 по результатам масс-спектрометрического определения, %; p – давление гексафторида урана в камере, мм.рт.ст.; I_γ – скорость счета гамма-квантов основного аналитического пика урана-235 с энергией 185,7 кэВ, с⁻¹; T – абсолютная температура гексафторида урана в камере, К.

Скорость счета гамма-квантов в основном аналитическом пике урана-235 с энергией 185,7 кэВ I_γ (чистая скорость счета в пике урана-235) рассчитывают по формуле

$$I_\gamma = I_\Sigma - I_B - I_\Phi, \quad (3)$$

где I_Σ – суммарная скорость счета гамма-квантов в области пика гамма-излучения урана-235, определенная при регистрации спектра гамма-излучения в выбранном энергетическом интервале (суммарная скорость счета), с⁻¹; I_B – скорость счета непрерывной фоновой составляющей под пиком полного поглощения основного аналитического пика урана-235 с энергией 185,7 кэВ, определенная в выбранном энергетическом интервале и обусловленная продуктами распада урана и радиоактивными примесями, находящимися в коррозионных отложениях на стенках измерительной камеры; радиоактивными примесями, которые могут присутствовать в анализируемом гексафториде урана, а также гамма-излучением от внешних источников (скорость счета подложки), с⁻¹; I_Φ – фоновая скорость счета гамма-квантов от урана-235, обусловленная коррозионными отложениями урана на стенках измерительной камеры, определенная в выбранном энергетическом интервале при регистрации спектра гамма-излучения от камеры без гексафторида урана или методом двух давлений (скорость счета фона), с⁻¹.

Энергетические интервалы для определения I_Σ и I_Φ (границы пика) выбирают различными, в зависимости от величины массовой доли урана-235 в гексафториде урана. Для гексафторида с массовой долей урана-235 равной или менее 0,711 % границы пика выбирают в диапазоне $\pm(1,8 \div 2,5)$ полной ширины пика на половине высоты (ПШПВ) симметрично относительно его центроиды, а для гексафторида урана с массовой долей урана-235 более 0,711 % границы пика выбирают несимметричными в диапазоне (3,5 \div 5) ПШПВ слева и (1,8 \div 2,5) ПШПВ справа относительно его центроиды.

Скорость счета непрерывной фоновой составляющей I_B определяют аппроксимацией усредненных значений скорости счета непрерыв-

ного фонового распределения слева и справа от границ пика в областях с шириной (0,5 \div 1) ПШПВ с помощью кривой Гальтона (рис. 4).

Для определения I_Φ , учитывая то, что практически полностью откачать ГФУ из измерительной камеры невозможно, были разработаны способы определения I_Φ методом двух давлений или методом линейной аппроксимации, изложенные в работе [3] и патентах РФ [5, 6], позволяющие определить фоновую скорость счета гамма-квантов от урана-235, обусловленную коррозионными отложениями урана на стенках измерительной камеры, без полной откачки ГФУ.

В данных исследованиях для определения I_Φ мы использовали метод двух давлений, причем было показано, что разность давлений должна быть не менее 20 мм.рт.ст. Сущность метода двух давлений заключается в измерении давления, температуры гексафторида урана и скорости счета гамма-квантов от урана-235 в одном и том же гексафториде урана при двух различных давлениях газа и расчете I_Φ по формуле

$$I_\Phi = \frac{T_2 \cdot p_1 \cdot (I_{\Sigma 2} - I_{B2}) - T_1 \cdot p_2 \cdot (I_{\Sigma 1} - I_{B1})}{T_2 \cdot p_1 - T_1 \cdot p_2}, \quad (4)$$

где p_1, p_2 – первое и второе давление гексафторида урана, при котором измеряются интенсивности гамма-излучения, мм.рт.ст.; T_1, T_2 – абсолютная температура гексафторида урана, определенная при первом (p_1) и втором (p_2) давлении гексафторида урана в измерительной камере, соответственно, К; $I_{\Sigma 1}, I_{\Sigma 2}$ – суммарная скорость счета гамма-квантов в области пика гамма-излучения урана-235, определенная в выбранном энергетическом интервале при первом (p_1) и втором (p_2) давлении гексафторида урана в измерительной камере, соответственно, с⁻¹; I_{B1}, I_{B2} – скорость счета непрерывной фоновой составляющей под пиком полного поглощения урана-235 с энергией 185,7 кэВ, определенная в выбранном энергетическом интервале при первом (p_1) и втором (p_2) давлении гексафторида урана в измерительной камере, соответственно, с⁻¹.

Определение изотопного состава урана (урана-235, урана-234) в технологических потоках ГФУ

Для сравнения метрологических характеристик масс-спектрометрического метода определения изотопного состава урана, гамма-спектрометрического метода с использованием сцинтилляционного детектора, реализованного в измерителях массовой доли урана-235 типа СКГ и разработанного гамма-спектрометрического метода с использованием полупроводни-

ковых детекторов были выполнены параллельные измерения массовой доли урана-235 на реальных технологических потоках ГФУ.

Экспериментальный гамма-спектрометр с ППД был подключен к технологическому потоку ГФУ параллельно с измерителем массовой доли типа СКГ и масс-спектрометром. Продолжительность одного измерения на гамма-спектрометре с ППД была установлена равной 30 минутам, один цикл измерения прибором СКГ занимал 35 минут, масс-спектрометрические измерения проводились с периодичностью один раз в час.

Полученные в течение полутора месяцев непрерывных измерений результаты определения массовой доли урана-235 в ГФУ с обогащением $C_5 = 3,504\%$ показали хорошую сходимость результатов всех трех методов измерений. Для наглядности на рис. 5 приведены экспериментальные данные, полученные на гамма-спектрометре с ППД, усредненные по двум 30-минутным измерениям, что эквивалентно продолжительности одного измерения, равном 1 часу, в сравнении с результатами масс-спектрометрических измерений. Измерения на технологическом потоке выполнялись непрерывно в течение 48 часов.

Основную относительную погрешность измерения массовой доли урана-235 $\delta, \%$, определяли по формуле

$$\delta = \frac{|C_{изм} - C_{мс}|}{C_{мс}} \cdot 100\%, \quad (5)$$

где $C_{изм}$ - значение массовой доли урана-235 по данным измерителя массовой доли типа СКГ или экспериментального гамма-спектроме-

тра, %; $C_{мс}$ - значение массовой доли урана-235 по данным масс-спектрометрических измерений, %.

По результатам 32 последовательных измерений было показано, что относительная погрешность измерения массовой доли урана-235 на товарном потоке ГФУ экспериментальным гамма-спектрометром с большим запасом удовлетворяет требованиям технических условий для приборов технологического контроля, хотя и оказалась несколько больше, чем у измерителя массовой доли типа СКГ (0,29 % и 0,17 %, соответственно). Это объясняется различием в значениях статистической погрешности регистрируемой первичной информации – скорости счета гамма-квантов в области энергии основного аналитического пика урана-235. Регистрируемая сцинтилляционным блоком детектирования скорость счета импульсов и используемая для расчета массовой доли урана-235 в ГФУ, составляет около 240 с^{-1} , а скорость счета гамма-квантов в основном аналитическом пике урана-235 с энергией 185,7 кэВ, регистрируемая экспериментальным гамма-спектрометром, примерно в четыре раза меньше и составляет около 56 с^{-1} .

За время работы экспериментального прибора на технологическом потоке низкообогащенного ГФУ было выполнено несколько технологических переходов для наработки товарной продукции с различной степенью обогащения урана-235. Полученные экспериментальные данные, приведенные на рис. 6, позволяют констатировать, что гамма-спектрометр с ППД оперативно отслеживал изменение массовой доли урана-235 в контролируемом потоке ГФУ при осуществле-

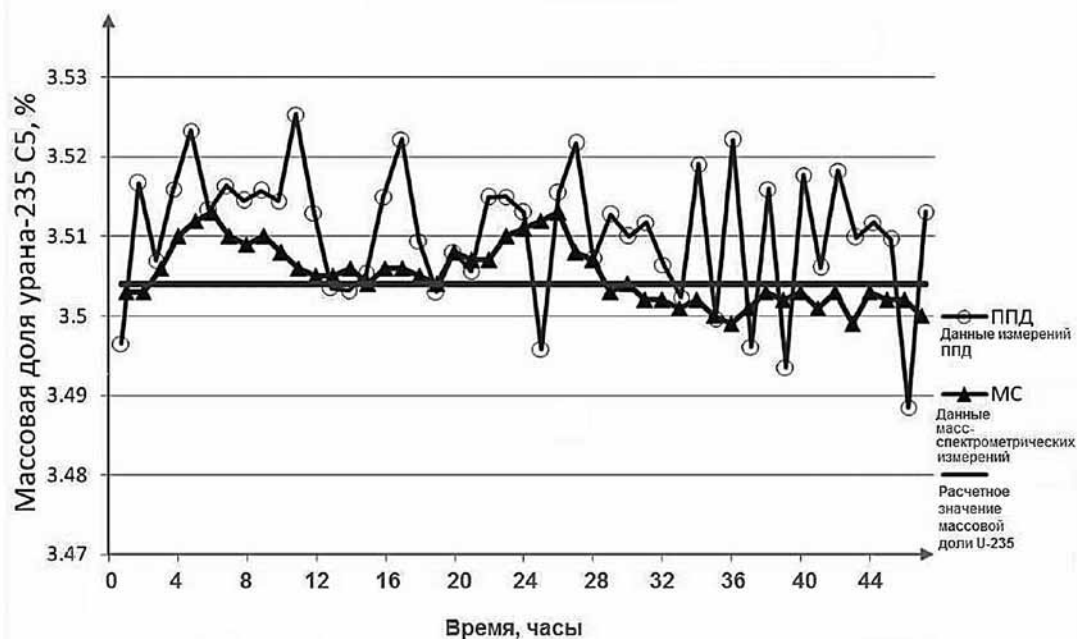


Рис. 5. Результаты определения массовой доли урана-235 в технологическом потоке ГФУ в течение 48 часов

нии технологического перехода с $C_5 = 4,95\%$ на $C_5 = 2,8\%$, не требуя дополнительных подстроек или калибровок после осуществления перехода.

Результаты испытаний показали так же, что экспериментальный гамма-спектрометр, как и ожидалось, благодаря использованным аппаратным и программным решениям, оказался практически нечувствителен к радиоактивным гамма-излучающим примесям, которые могут присутствовать в ГФУ марок РС (гексаф-

торид регенерированного урана, полученный из топлива реакторов наработчиков оружейного плутония) и особенно РТ (гексафторид регенерированного урана, полученный из топлива реакторов атомных электростанций). Применение спектрометрических методов обработки информации и современной цифровой электроники с дополнительными настройками (схема коррекции баллистического дефицита, режектор наложений, схема оптимизации учета мертвого

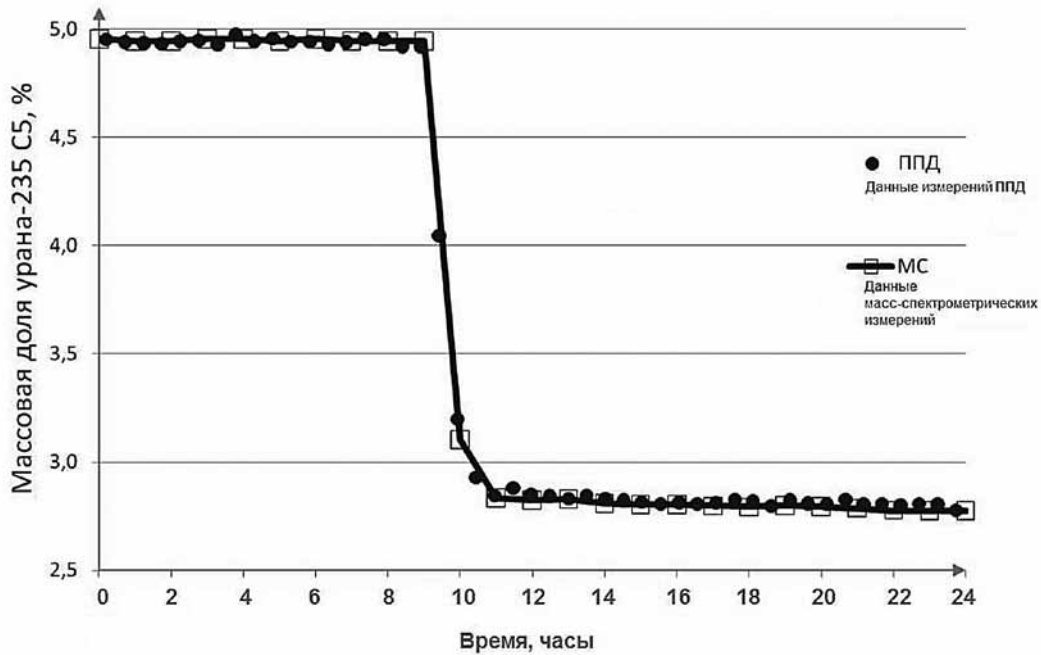


Рис. 6. Результаты определения массовой доли урана-235 гамма-спектрометрическим (ППД) и масс-спектрометрическим методами при технологическом переходе

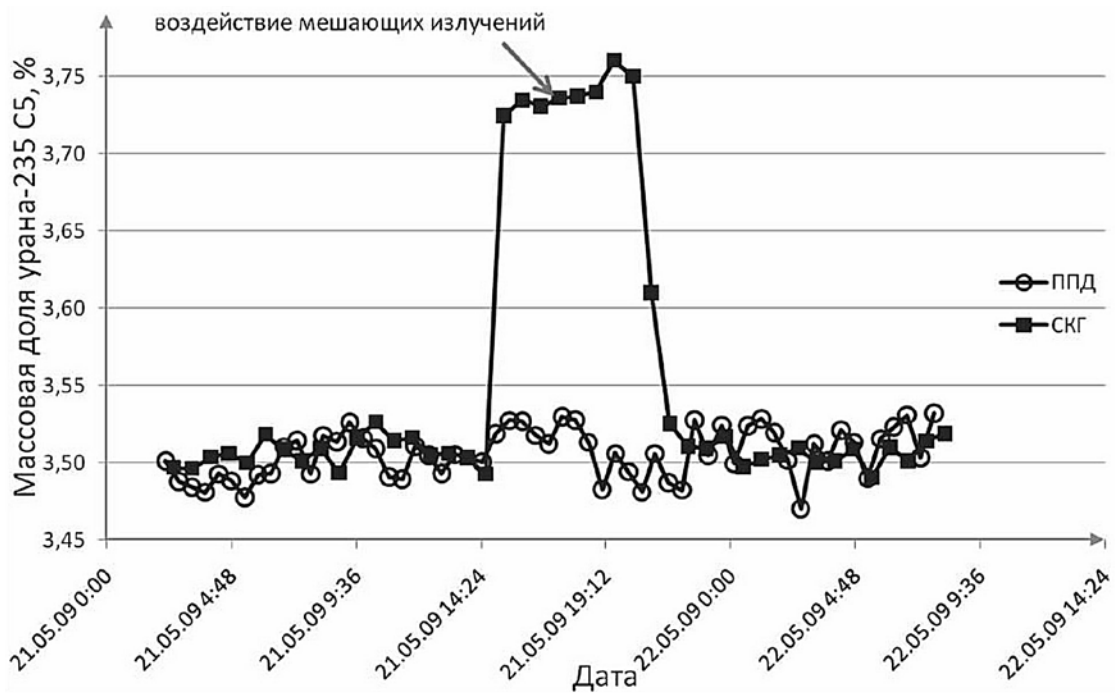


Рис. 7. Результаты определения массовой доли урана-235 при наличии мешающих излучений

времени, регулировка параметров цифрового фильтра) позволяет корректно учитывать вклад мешающих излучений в определение содержания урана-235 в анализируемом ГФУ. На рис. 7 приведены результаты определения массовой доли урана-235 гамма-спектрометром с ППД и измерителем массовой доли типа СКГ при воздействии мешающих излучений примерно одинаковой интенсивности. При наличии мешающих излучений СКГ начинает определять массовую долю урана-235 некорректно (значение

массовой доли урана-235 возросло с ~ 3,5 % до ~3,75 %, при этом, основная относительная погрешность определения массовой доли урана-235, рассчитанная по (5), составила 7,1 %, что практически в 10 раз больше, чем требуемая по техническим условиям (ТУ) для приборов технологического контроля). В то же время гамма-спектрометр с ППД свободен от недостатков, присущих измерителям массовой доли типа СКГ, и при воздействии мешающих излу-

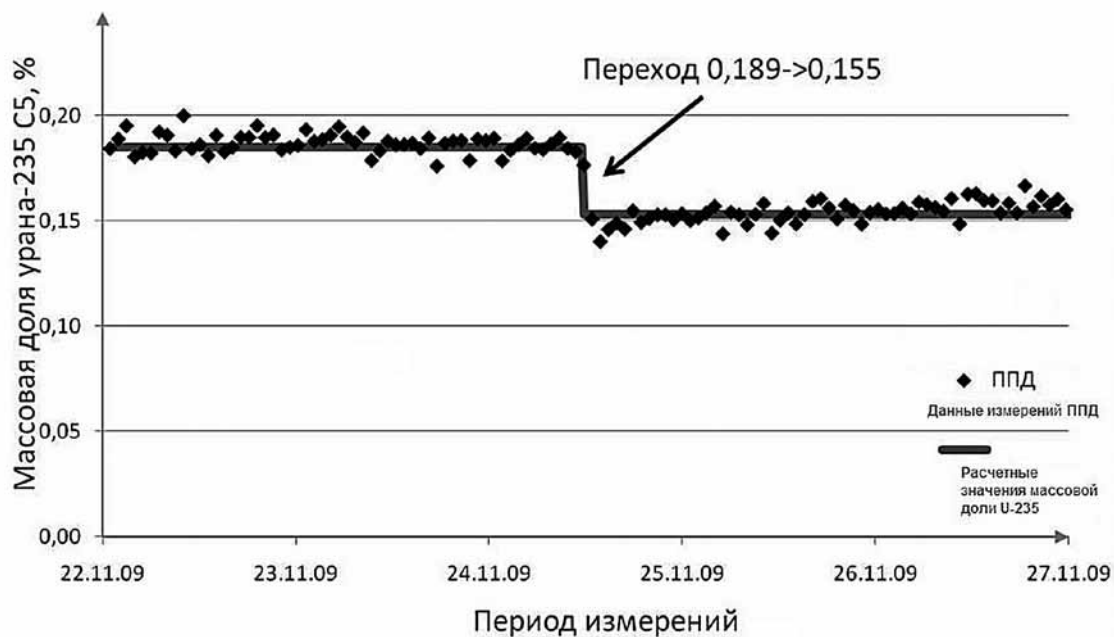


Рис. 8. Результаты определения массовой доли урана-235 при технологическом переходе с C5 = 0,189 % на C5 = 0,155 %

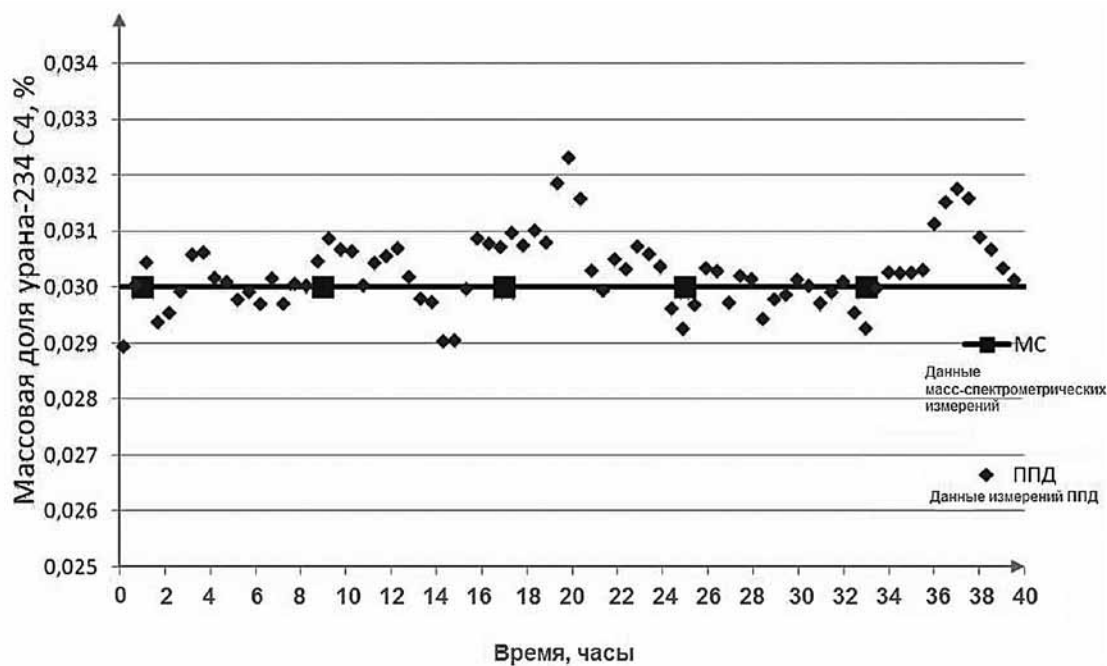


Рис. 9. Результаты определения массовой доли урана-234 в течение двух суток

ний продолжает корректно определять массовую долю урана-235.

Проведенные испытания на потоке отвального гексафторида урана (массовая доля урана-235 в ГФУ порядка 0,2 %) позволяют констатировать, что экспериментальный гамма-спектрометр с ППД при времени измерения спектров гамма-излучения в течение одного часа при давлении ГФУ в измерительной камере порядка 5 мм.рт.ст корректно определяет не только сами значения массовой доли урана-235, но и их значительные изменения в потоках ГФУ, связанные с технологическими переходами с погрешностью по крайней мере не хуже, чем у СКГ. На рис. 8 для примера приведены результаты определения массовой доли урана-235 экспериментальным гамма-спектрометром при технологическом переходе с $C_5 = 0,189\%$ на $C_5 = 0,155\%$.

Проведенные исследования также убедительно показали возможность определения с помощью гамма-спектрометра с ППД в контролируемом ГФУ массовой доли урана-234, причем относительная погрешность определения массовой доли урана-234 при времени измерения 5 часов оказалась сопоставимой с погрешностью масс-спектрометрического определения урана-234.

Для примера на рис. 9 приведены результаты определения массовой доли урана-234, полученные на одном из товарных потоков ГФУ разделительного производства ОАО «УЭХК» в течение двух суток (представлены результаты, полученные усреднением методом скользящего среднего по 10 измерениям и масс-спектрометрические данные).

Заключение

Проведенная в течение более полугода опытная эксплуатация разработанного экспериментального ППД гамма-спектрометра с термоэлектрическим холодильником на технологических потоках ГФУ цехов разделительного производства ОАО «УЭХК» убедительно показала возможность использования гамма-спектрометрических систем для контроля технологического процесса производства обогащенного урана. Определенная в начале работы калибровочная постоянная позволила проводить измерения степени обогащения урана-235 как в штатном режиме, так и при технологических переходах на товарном потоке ГФУ, а также и на отвальном потоке ГФУ без дополнительных калибровок. Таким образом, в плане долговременной стабильности работы ППД гамма-спектрометр имеет преимущество перед ИМД (СКГ), требующим периодической калибровки.

Относительная погрешность измерения массовой доли урана-235 на товарном потоке ГФУ экспериментальным гамма-спектрометром с большим запасом удовлетворяет требовани-

ям технических условий для СКГ, хотя и оказалась несколько больше, чем у СКГ (0,29 % и 0,17 %, соответственно). На отвальном потоке ГФУ погрешности измерения массовой доли урана-235 экспериментальным гамма-спектрометром и СКГ оказались одинаковы.

В то же время экспериментальный гамма-спектрометр, как и ожидалось, благодаря использованному аппаратным и программным решениям, оказался практически нечувствителен к радиоактивным гамма-излучающим примесям, которые могут присутствовать в ГФУ марок РС и особенно РТ. Применение спектрометрических методов обработки информации и современной цифровой электроники с дополнительными настройками (схема коррекции баллистического дефицита, режектор наложений, схема оптимизации учета мертвого времени, регулировка параметров цифрового фильтра) позволяет корректно учитывать вклад мешающих излучений в определение содержания урана-235 в анализируемом ГФУ.

Кроме того, проведенные исследования показали возможность определения в контролируемом ГФУ массовой доли урана-234, причем относительная погрешность определения массовой доли урана-234 при времени измерения 5 часов оказалась сопоставимой с погрешностью масс-спектрометрического определения урана-234.

Экспериментальный гамма-спектрометр в системе технологического контроля может решать следующие задачи:

- долговременный автоматический контроль массовой доли урана-235 в технологических потоках ГФУ без необходимости его обслуживания, в том числе в случае присутствия в ГФУ радиоактивных примесей;
- долговременный автоматический контроль массовой доли урана-234 в технологических потоках слабообогащенного ГФУ;
- представление информации по изменению массовой доли урана-235 в технологических потоках ГФУ в режиме реального времени (периодичность до 1 мин).

В стоимостном плане (стоимость прибора составляет порядка 3 млн. рублей) экспериментальный гамма-спектрометр имеет неоспоримое преимущество перед масс-спектрометрами, стоимость которых более 12 млн. рублей. Прибор практически не требует обслуживания, в том числе использования жидкого азота и стандартных образцов изотопного состава урана при проведении измерений. Кроме того, в отличие от масс-спектрометров, экспериментальный гамма-спектрометр может быть установлен в необходимых точках контроля непосредственно в машзалах цехов разделительного производства.

Поэтому разработанный гамма-спектрометр можно рекомендовать для использования в системах технологического контроля и при переработке регенерированного урана марок РС и РТ.

Литература

1. Артемьев В.А., Сапрыгин А.В., Залецкий В.Э., Овчинников В.Ю., Маркин В.А. Избирательный радиометр ИМД – прибор для неразрушающего контроля степени обогащения урана-235 в гексафториде урана // Вопросы атомной науки и техники. 2006. Вып. 60. С. 12-20.
2. Артемьев В.А., Гусев В.П., Ткачев С.В., Сапрыгин А.В., Залецкий В.Э., Овчинников В.Ю., Маркин В.А. Результаты испытаний радиометров типа ИМД без рентгеновского датчика // Вопросы атомной науки и техники. 2006. Вып. 60. С. 21-34.
3. Гусев В.П., Ткачев С.В., Павликов В.А. Гамма-спектрометр для контроля обогащения газообразного гексафторида урана изотопом уран-235 // Аналитика и контроль. 2009. Т. 14, №13. С. 193-198.

4. Сапрыгин А.В., Залецкий В.Э., Овчинников В.Ю. Возможности использования полупроводниковых детекторов для технологического контроля массовой доли урана-235 в разделительном производстве // Сборник материалов тринадцатого ежегодного семинара «Спектрометрический анализ. Аппаратура и обработка данных на ПЭВМ» Обнинск: ГОУ ГЦИПК, 2007. Ч. 1. С. 80.

5. Пат. 2325672, Рос. Федерация. Способ контроля массовой доли изотопа уран-235 в газовой фазе гексафторида урана и система измерения для его реализации / А.В. Сапрыгин, В.Э. Залецкий, В.Ю. Овчинников, Р.Р. Ахтямов; ФГУП «УЭХК» - № 2006138941/28; заявл. 03.11.2006; опубл. 27.05.2008, Бюл. № 15.

6. Пат. 2330308, Рос. Федерация. Способ контроля массовой доли изотопа уран-235 в газовой фазе гексафторида урана и система измерения для его реализации / В.П. Гусев, С.В. Ткачев, В.А. Павликов, В.А. Артемьев, А.В. Сапрыгин, В.Э. Залецкий, В.Ю. Овчинников; ФГУП «УЭХК» - № 2006138927/28; заявл. 03.11.2006; опубл. 27.07.2008, Бюл. № 21.

RESULTS OF DEVELOPMENT AND EXPERIMENTAL OPERATION OF GAMMA-RAY SPECTROMETRY DEVICES BASED ON ELECTRICALLY REFRIGERATED SEMICONDUCTOR DETECTOR FOR ²³⁵U ONLINE CONTROL IN ENRICHMENT PRODUCTION

V.E. Zaletsky, V.Yu. Ovchinnikov, A.V. Saprygin

*Open Joint Stock Company «Ural Electrochemical Integrated Plant» (JSC «UEIP»),
Ul. Dzerzhinskogo 2, Novouralsk,
Sverdlovskaya obl., 624130, Russia
czl@ueip.ru*

The results of development and experimental operation of the gamma-ray spectrometer based on electrically refrigerated high resolution semiconductor detector and digital gamma-ray spectrometry system for ²³⁵U online control enrichment production at the JSC «UEIP» are considered.

The advantages of the developed gamma-ray spectrometer and applied spectrometric methods prior to the traditional gamma-ray spectrometers with scintillation detectors are described.

Key words: enrichment production, uranium hexafluoride, ²³⁵U, gamma-ray spectrometer, semiconductor detector.