

УДК 006.91:539.14

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПЕРВИЧНЫЙ СПЕЦИАЛЬНЫЙ ЭТАЛОН ЕДИНИЦЫ МОЩНОСТИ ПОГЛОЩЁННОЙ ДОЗЫ ИНТЕНСИВНОГО ФОТОННОГО, ЭЛЕКТРОННОГО И БЕТА-ИЗЛУЧЕНИЙ ДЛЯ РАДИАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ГЭТ 209-2014

**В.В. Алейкин, В.В. Генералова, А.А. Громов, М.Н. Гурский,
А.П. Жанжора, И.А. Емельяненко, О.И. Коваленко, В.П. Тенишев**

*ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл.
tenishev@vniiftri.ru*

В работе приводится описание созданного во ФГУП «ВНИИФТРИ» Государственного первичного специального эталона единицы мощности поглощенной дозы интенсивного фотонного, электронного и бета-излучений для радиационных технологий и его технические характеристики.

Ключевые слова: радиационные технологии, поглощенная доза, мощность поглощенной дозы, калориметр интегрального типа

Введение

Радиационные технологии активно применяются в различных отраслях народного хозяйства при производстве и обработке материалов и изделий с целью создания в них новых свойств с широким применением интенсивного излучения в промышленных масштабах. Обеспечение единства измерений [1] требует повышения точности измерения поглощенной дозы (ПД), мощности поглощенной дозы (МПД) излучений на радиационно-технологических установках и распределения поглощенной дозы в облучаемых объектах (материалах). Это требование привело к необходимости создания Государственного первичного специального эталона единицы мощности поглощенной дозы интенсивного фотонного, электронного и бета-излучений (далее - эталона).

Под термином радиационные технологии понимается область применения воздействия интенсивных потоков ионизирующих излучений от различных типов источников с целью изменения существующих свойств различных веществ и материалов, применяемых в медицине, биологии, химии, электронике, космической области и т.д [2-5]. В медицинской промышленности – это радиационная стерилизация медицинских изделий - систем переливания и консервации крови, одноразовых медицинских изделий (комплектов для различных хирургических операций, халатов, одежды медперсонала, простыней и т.п.), инструментов и др. В биологии - радиационная обработка биоматериалов с целью их деконтаминации и обеззараживания, стерилизация одноразовой лабораторной посуды. В пищевой промышленнос-

ти - дезинфекция и дезинсекция продуктов растениеводства, радиуризация пищевой продукции. В химической промышленности - радиационная обработка материалов с целью повышения изоляционных свойств, получения термостойких и термоусаживающихся изделий из пластмасс. В электронной промышленности - облучение изделий для придания им новых свойств, испытание изделий на радиационную стойкость. В космической индустрии - изучение воздействия ионизирующих излучений на живые и неживые объекты в космических условиях.

Для обеспечения единства измерений ПД и МПД интенсивных излучений в радиационных технологиях во ФГУП «ВНИИФТРИ» в 2014 году создан и утвержден Государственный первичный специальный эталон единицы мощности поглощенной дозы интенсивного фотонного, электронного и бета-излучений ГЭТ 209-2014. При этом следует отметить, что действующие государственные первичные эталоны единицы МПД, такие как ГЭТ 38-2011 и ГЭТ 9-82, ориентированы на применение в области медицины (лучевая терапия), охраны труда и охраны окружающей среды. Максимальные значения ПД и МПД, воспроизводимые этими эталонами, на несколько порядков ниже тех, что востребованы в радиационных технологиях и воспроизводятся на новом эталоне.

В качестве единого метода воспроизведения единицы МПД фотонного, электронного и бета-излучений – Гр/с (Грей в секунду или Дж/кг в с), выбран калориметрический метод, как абсолютный и наиболее универсальный и точный. Этот метод основан на измерении мощности тепловыделения поглощенной в поглотителе калориметра энергии ионизирующего излучения. Оптимальным типом калориметра для измерения мощности поглощенной энергии этих видов излучения является калориметр интегрального теплового потока. Калориметры для фотонного, электронного и бета-излучения отличаются лишь по конструкции, учитывающей особенности взаимодействия излучения данного вида с веществом и способами измерений теплового потока от поглотителя.

Состав специального первичного эталона

Государственный специальный первичный эталон ГЭТ 209-2014 состоит из комплекса следующих технических средств и вспомогательных устройств:

1. Калориметры:

- калориметр интегрального теплового потока с поглотителем из графита КТП-ГР-γ № 1 для воспроизведения единицы мощности поглощенной дозы фотонного излучения с энергией 0,66 МэВ (гамма-излучение Cs-137) и 1,25 МэВ (гамма-излучение Co-60) в графите;

- калориметр интегрального теплового потока с поглотителем из

полистирола КТП-ПС-γ № 4 для воспроизведения единицы мощности поглощенной дозы фотонного излучения с энергией 0,66 МэВ (гамма-излучение Cs-137) и 1,25 МэВ (гамма-излучение Co-60) в полистироле;

- транспортируемая калориметрическая установка ТКУГ-е для воспроизведения и передачи единицы мощности поглощенной дозы электронного излучения ускорителей электронов с энергией от 3 до 10 МэВ, включающая в себя:

выносной блок с монитором-коллектором электронов для контроля флуктуаций тока пучка электронов ускорителя при воспроизведении и передаче единицы мощности поглощенной дозы электронного излучения соподчиненным средствам измерений;

дифференциальный калориметр интегрального теплового потока КТП-е для воспроизведения единицы мощности поглощенной дозы электронного излучения в графите в диапазоне энергий от 3 до 10 МэВ;

калориметр интегрального теплового потока с поглотителем из графита КТП-β № 1 для воспроизведения единицы мощности поглощенной дозы бета-излучения с граничной энергией 2,26 МэВ (бета-излучение Sr-90 + Y-90);

фантом-калориметр фотонного излучения ФК-γ для размещения градуируемых детекторов;

фантом-калориметр бета-излучения ФК-β для размещения градуируемых детекторов.

2. Компараторы:

- графитовый калориметр 10 МэВ В6004 (GEX Corporation) № 3079;
- полистирольный калориметр 5 МэВ В6001 (GEX Corporation) № 2434;
- универсальный дозиметр ДКС-101 № 119 с ионизационной камерой БМК-06 № 13119.

3. Источники ионизирующего излучения:

- гамма-установка МРХ-гамма-100 с радионуклидными источниками Co-60;

- гамма-установка ЛМБ-гамма-1м с радионуклидными источниками Cs-137;

- бета-установка БОИС-3, с радионуклидным источником Sr-90 + Y-90.

Средства воспроизведения единицы поглощенной дозы и мощности поглощенной дозы

Источники фотонного излучения. Источниками фотонного излучения на эталоне служат радиационные установки ЛМБ-Гамма-1М и МРХ-Гамма-100, заряженные радионуклидными источниками изотопов цезий-137 и кобальт-60 высокой активности. Средство воспроизведения МПД фотонного излучения – калориметры КТП-Гр-γ и КТП-Пс-γ с поглотителями из графита

и полистирола, соответственно. Конструкция обоих калориметров одинакова и отличается материалом поглотителя. Она схематически изображена на рис. 1.

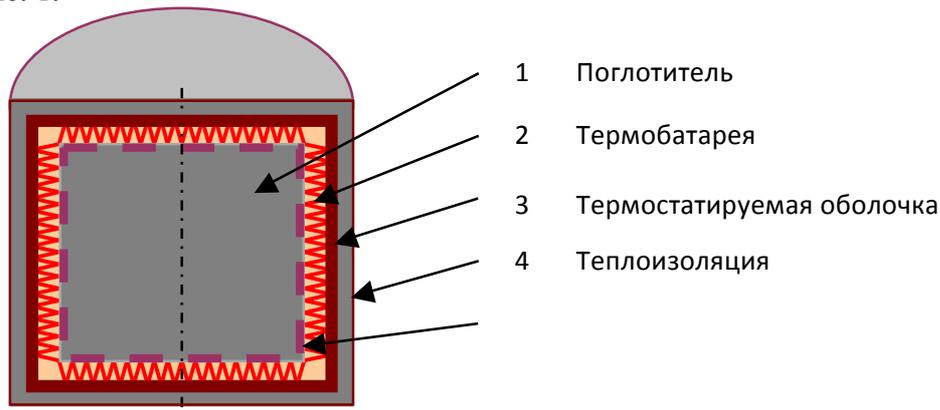


Рис. 1. Конструкция калориметра фотонного излучения

Поглотитель калориметра 1 и окружающая термостатируемая оболочка 3 изготовлены из графита особой чистоты. Для измерений калориметр помещают в рабочую камеру этих установок.

Мощность поглощенной дозы фотонного излучения в графите (полистироле) определяется из соотношения:

$$\dot{D} = \frac{I_n \cdot U_n \cdot (\Delta U_{тб})_{рад}}{M_{эф} (\Delta U_{тб})_{эл}} (1 - \eta),$$

где $M_{эф}$ – эффективная масса поглотителя,

I_n – сила тока, протекающего через калибровочный нагреватель при градуировке калориметра по мощности тепловыделения (сила тока определяется по падению напряжения на эталонной мере сопротивления R3030),

U_n – падение напряжения на нагревательном элементе,

$(\Delta U_{тб})_{рад}$ и $(U_{тб})_{эл}$ – термо ЭДС термобатареи под действием облучения и при градуировке соответственно,

η – «тепловой дефект» в материалах, входящих в состав поглотителя калориметра (относительная доля поглощенной энергии ионизирующего излучения, которая затрачивается либо дополнительно выделяется в результате радиационно-химических реакций, протекающих при взаимодействии излучения с веществом).

Эффективная масса поглотителя калориметра $M_{эф}$ рассчитывалась с учетом массовых коэффициентов поглощения материалов, входящих в состав поглотителя, усредненных по действующему спектру фотонного излучения, определяемых по соотношению:

$$M_{\text{эф}} = m_{\text{зр}} + \sum m_i \cdot \frac{(\mu_{\text{en},m})_i}{(\mu_{\text{en},m})_{\text{гр}}},$$

где: $m_{\text{зр}}$ – масса графитового цилиндра, образующего поглотитель;
 m_i – масса i -го материала, входящего как примесь в состав поглотителя (это термобатарея, проволочный нагреватель, подводящие провода, клей);
 $(\mu_{\text{en},m})_i / (\mu_{\text{en},m})_{\text{зр}}$ – отношение массовых коэффициентов поглощения энергии i -го материала и графита, усредненных по действующему спектру фотонного излучения.

Усреднение массовых коэффициентов энергии по спектру фотонного излучения [5] осуществляется по формуле:

$$\frac{\bar{\mu}_{\text{en}}}{\rho} = \frac{1}{\Psi} \int_0^{E_{\text{max}}} \Psi_e(E) \frac{\mu_{\text{en}}(E)}{\rho} dE,$$

где $\Psi_e(E)$ – энергетический флюенс фотонного излучения.

Проведен анализ источников погрешности и неопределенности при воспроизведении единицы мощности поглощенной дозы фотонного излучения калориметром интегрального теплового потока и проведена их количественная оценка. Результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1

Источники погрешности, неопределенности	So. 10 ²	θo. 10 ²	u _{oA} . 10 ²	u _{oB} . 10 ²
Эффективная масса поглотителя, $M_{\text{эф}}$		0,20		0,12
ТермоЭДС термобатареи при облучении, $(\Delta U_{\text{тб}})_{\text{рад}}$	0,15	0,2	0,15	0,12
ТермоЭДС термобатареи при градуировке, $(\Delta U_{\text{тб}})_{\text{эл}}$	0,12	0,2	0,12	0,12
Измерение мощности тепловыделения при градуировке, $I_n U_n$	0,05	0,20	0,05	0,12
«Тепловой дефект» в материалах, входящих в состав поглотителя калориметра, $k_{\text{тд}}$		0,2		0,12
Суммарные значения	0,2	0,6	0,2	0,3

Среднее квадратическое отклонение среднего арифметического 0,2 %;

Доверительная граница относительной систематической погрешности НСП ($P = 0,99$) 0,6 %;

Суммарная стандартная неопределенность 0,4 %;

Расширенная неопределенность при коэффициенте охвата $K = 2$ 0,8 %.

Передача единицы МПД осуществляется методом прямых измерений или с помощью компаратора. Для передачи единицы МПД от эталона

соподчиненным средствам измерений служит дозиметр ДКС-101 с графитовой ионизационной камерой БДМГ и графитовый фантом.

Установка электронного излучения

Источник электронного излучения - промышленный ускоритель электронов типа ЛУЭ с энергией ускоренных электронов от 3 до 10 МэВ.

Средство воспроизведения МПД электронного излучения - дифференциальный калориметр локально-поглощенной дозы КТП-е. Он представляет собой разновидность калориметра интегрального теплового потока, в котором производится измерение теплового потока по всей поверхности поглотителя калориметра. Результат измерения МПД таким калориметром не зависит от характера распределения источников тепла в поглотителе калориметра и определяется только значением мощности тепловыделения в нем.

Калориметр работает в широком диапазоне значений начальной энергии ускоренных электронов, что соответствует различному распределению поглощенной энергии электронного излучения по глубине в графитовом фантоме. Распределения поглощенной дозы D по глубине облучаемого материала при различной начальной энергии ускоренных электронов E показаны на рис. 2. Из рисунка видно, что максимум энергии электронов, поглощенной в облучаемом материале, приходится на глубине $1/3$ пробега электронов данной энергии в данном веществе. Для более точного воспроизведения МПД электронного излучения поглотитель калориметра должен располагаться в наиболее равномерной области поля излучения, т. е. на глубине, соответствующей максимуму распределения для данной энергии E . Дифференциальный калориметр состоит из двух одинаковых калориметров с одинаковой чувствительностью, термобатарей которых включены встречно, образуя дифференциальную схему. Основной калориметр I установлен подвижно в фантоме 5 , что позволяет помещать его на глубину, соответствующую максимуму распределения поглощенной энергии в калориметре за счет изменения толщины слоя графита 4 . Опорный калориметр 8 располагается в графитовом фантоме $7, 9$ на глубине 6 , превышающей пробег электронов данной энергии в графит, и служит для вычитания «фонового» теплового сигнала при включении его в дифференциальную схему измерений.

Схема калориметра локально-поглощенной дозы в разрезе представлена на рис. 2.

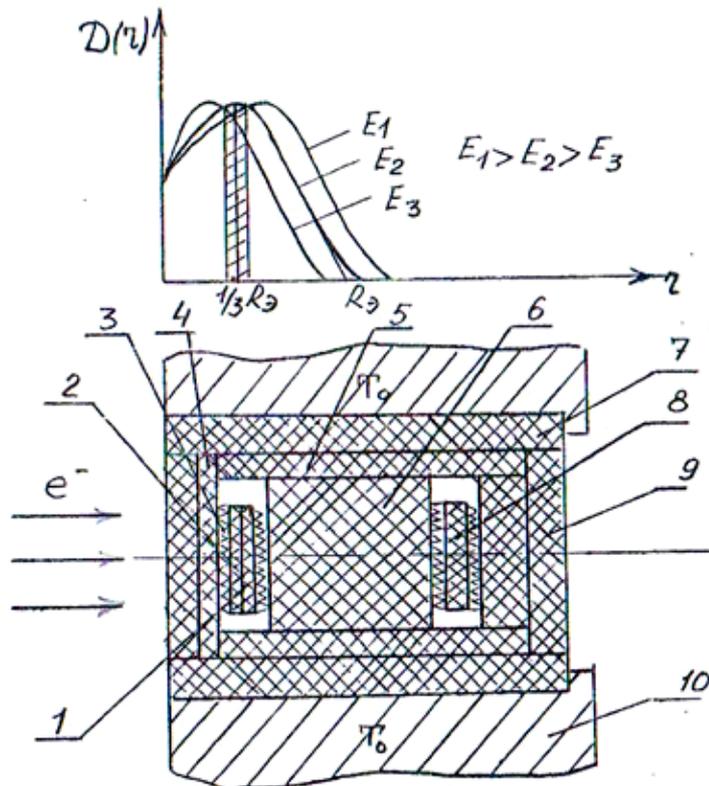


Рис. 2. Схема калориметра электронного излучения КТП-е в разрезе

МПД электронного излучения в материале поглотителя калориметра – графите \dot{D}_K , Гр·с⁻¹, определяется из соотношения:

$$\dot{D}_K = \frac{\Delta U_{\text{рад}}}{M_{\text{эф}} X_{\text{ТВ}}} = \frac{I^2 R_{\text{н}} \Delta U_{\text{рад}}}{M_{\text{эф}} \Delta U_{\text{эл}}},$$

где: I – сила электрического тока, протекающего через нагревательный элемент поглотителя калориметра во время градуировки калориметра,

$R_{\text{н}}$ – сопротивление нагревательного элемента,

$\Delta U_{\text{рад}}$ и $\Delta U_{\text{эл}}$ – изменение напряжения с термопары калориметра при облучении ионизирующим излучением и при градуировке калориметра электрическим током, измеряемое нановольтметром.

$X_{\text{ТВ}}$ – чувствительность калориметра по мощности тепловыделения,

определяется при электрической калибровке калориметра, производимой перед проведением измерений мощности поглощенной дозы на ускорителе

электронов, по соотношению:

$$X_{ТВ} = \frac{\Delta U_{эл}}{I^2 R_H}$$

$M_{эф}$ – эффективная масса поглотителя калориметра, определяемая из массовых содержаний основного материала графита и посторонних включений и отношений их массовых тормозных способностей, усредненных по действующему спектру электронного излучения по соотношению:

$$M_{эф} = m_{гр} + \sum m_i \cdot \frac{(\overline{s/\rho})_i}{(\overline{s/\rho})_{гр}}$$

где: $m_{гр}$ – масса графитового поглотителя;

m_i – масса i -го материала, входящего как примесь в состав поглотителя (градуировочный нагреватель, подводящие провода, клей, изоляторы);

$\frac{(\overline{s/\rho})_i}{(\overline{s/\rho})_{гр}}$ – отношение массовых ограниченных тормозных способностей i -го материала и графита, усредненных по действующему спектру электронного излучения.

Приведен анализ источников погрешности и неопределенности при воспроизведении единицы мощности поглощенной дозы электронного излучения калориметром интегрального теплового потока и проведена их количественная оценка. Результаты приведены в табл. 2.

Таблица 2

Источники погрешности, неопределенности	$S_o \cdot 10^2$	$\theta_o \cdot 10^2$	$u_{oA} \cdot 10^2$	$u_{oB} \cdot 10^2$
Измерение термо ЭДС калориметра, U_δ	0,4	0,9	0,4	0,5
Определение эффективной массы поглотителя калориметра, $M_{эф}$		1,3		0,8
Определение чувствительности калориметра по мощности тепловыделения, $X_{тв}$	0,3	0,8	0,3	0,5
Определение коэффициента учета теплового дефекта, $K_{тв}$		0,3		0,2
Суммарные значения	0,5	2,5	0,5	1,0

Суммарная неисключенная относительная систематическая погрешность НСП ($P = 0,99$)	2,5 %
Среднее квадратическое отклонение среднего арифметического	0,5 %
Суммарная относительная стандартная неопределенность	1,2 %
Суммарная расширенная неопределенность при коэффициенте охвата $K = 2$	2,4 %

Калориметр КТП-е помещен в установку ТКУГ-е, которая представляет собой комплекс аппаратуры в составе:

- выносной блок с калориметром интегрального теплового потока КТП-е, монитором-коллектором электронов, системой перемещения и охлаждения калориметра. Выносной блок установки размещается на ускорителе в поле электронного излучения;

- пульт дистанционного управления установкой ПДУ, осуществляющий дистанционное управление выносным блоком установки и проведение измерений мощности поглощенной дозы электронного излучения калориметром КТП-е;

- персональный компьютер типа ноутбук, подключаемый к ПДУ.

Для передачи единицы МПД от эталона соподчиненным средствам измерений применяется монитор-коллектор электронов, а также набор графитовых фантомов в составе установки ТКУГ-е.

Установка бета-излучения. Источник бета-излучения - радиационно-технологическая установка бета-излучения БОИС-3, заряженная радионуклидным источником изотопов стронций-90+иттрий-90 высокой активности.

Средство воспроизведения МПД бета-излучения - калориметр интегрального теплового потока со сменным поглотителем КТП-в. Применяемые в нем для измерения изменения температуры поглотителя разработанные во ФГУП «ВНИИФТРИ» уникальные тонкопленочные термопреобразователи позволяют измерять мощность тепловыделения, а следовательно, и МПД в сменном поглотителе, изготовленном из любого нужного материала (в твердом состоянии) толщиной от 0,1 до 1 мм. Измерение МПД непосредственно в заданном материале позволяет исключить составляющую погрешности измерения МПД, связанную с пересчетом от значения МПД в стандартном материале поглотителя – графите.

Калориметр позволяет измерять МПД бета-излучения изотопа $Y^{90} + Sr^{90}$ в диапазоне от 0,3 до 100 Гр/с с погрешностью не более 2 %.

Устройство калориметра схематически изображено на рис. 3.

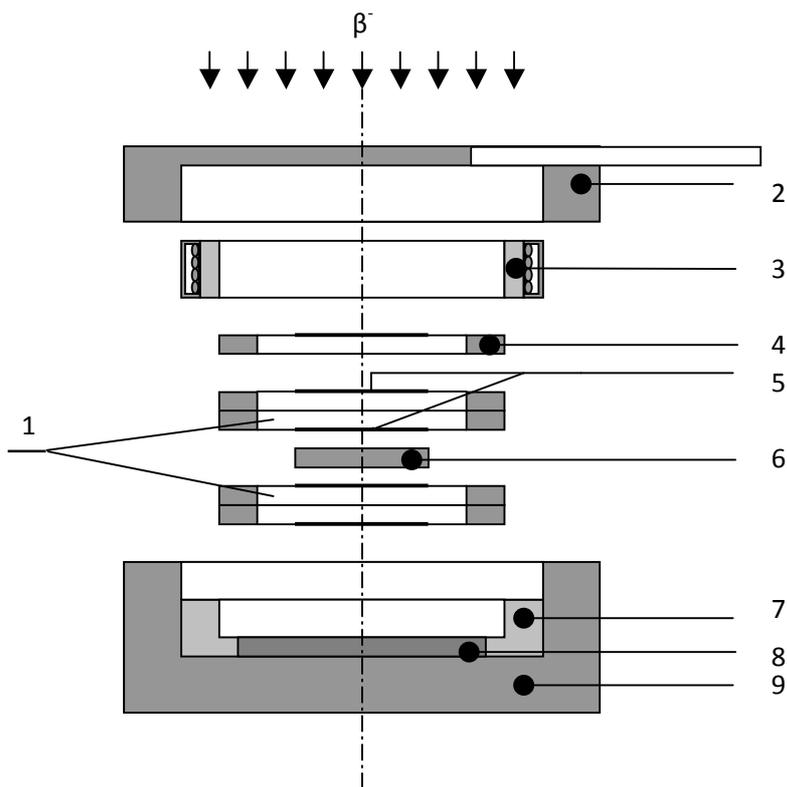


Рис. 3. Схематический разрез калориметра КТП-б

Поглотитель *б* помещен в измерительную оболочку, которая состоит из двух одинаковых датчиков теплового потока *1*. Каждый датчик теплового потока состоит из двух одинаковых пленочных фольговых элементов, разделенных между собой воздушным промежутком около 3 мм. Каждый пленочный фольговый элемент содержит по два одинаковых никелевых фольговых резистора, один из которых используется как термометр сопротивления *5*, а другой в качестве градуировочного нагревателя. Поглотитель зажимается между датчиками теплового потока. Датчики регистрируют тепловые потоки с торцевых поверхностей поглотителя. Встречное включение их между собой позволяет выделить из общего сигнала информацию о тепловых потоках от внутренних источников тепла (из поглотителя) и подавить сигнал от внешних источников тепла (потери тепла через тонкое внешнее окно).

Тепловой поток с боковой поверхности поглотителя не регистрируется. Для учета его влияния, а также различий тепловых сопротивлений и коэффициентов чувствительности двух датчиков, имеется дополнительный плоский пленочный фольговый нагревательный элемент *4*, служащий для создания регулируемого, внешнего по отношению к поглотителю, теплового

потока. Изменяя в процессе градуировки калориметра степень его нагрева, определяют соотношение между сигналами датчиков теплового потока, позволяющее исключить влияние внешних тепловых потоков на полезный сигнал калориметра.

Измерительная оболочка помещена в термостатированный корпус 3 и 7 с тонким входным окном для проникновения бета-излучения. Температура корпуса (303 – 308) К поддерживается постоянной с точностью не хуже 10^{-4} К с помощью системы автоматического регулирования температуры, построенной на основе прецизионных АЦП/ЦАП фирмы Analog Device, интегрированных в систему сбора и обработки данных. Нагрев корпуса калориметра осуществляется с помощью встроенного проволочного нагревателя 3. Для уменьшения влияния изменений окружающей температуры калориметр, в свою очередь, помещен в теплоизолирующую оболочку из пенопласта 9. Для демпфирования быстрых изменений внешнего теплового потока через тонкое входное окно калориметр прикрыт пенопластовой крышкой 2 с тонким лавсановым окном толщиной 2 мкм.

На каждом пленочном измерительном элементе расположены два одинаковых фольговых никелевых резистора, один из которых используется в качестве термометра сопротивления в измерителе теплового потока, а другой – в качестве градуировочного нагревателя калориметра или для измерения температуры корпуса калориметра. В дно корпуса за измерительной оболочкой вставляется вкладыш 8 из того же материала, что и поглотитель, толщиной, достаточной для полного поглощения прошедшего излучения. Все необходимые сигналы с помощью проводов выведены на разъем.

В общем виде мощность поглощенной дозы бета-излучения определяется из соотношения:

$$\dot{D} = \frac{W_1 - W_0}{M_n}$$

В свою очередь:

$$W = \frac{I_n \cdot U_n \cdot U_{rad}}{U_{эл}}$$

где

M_n – масса поглотителя: для калориметра КТП-β № 1 масса графитового поглотителя $M_n = (203,2 \pm 0,2)$ мг;

I_n – сила тока, протекающего через градуировочный нагреватель во время градуировки калориметра (сила тока определяется по падению напряжения на мере сопротивления P3030 номиналом 10 Ом, класса 0,005);

U_n - падение напряжения на нагревательном элементе;

$U_{\text{рад}}$ и $U_{\text{эл}}$ – сигнал калориметра при измерении МПД и при градуировке соответственно.

Приведен анализ источников погрешности и неопределенности при воспроизведении единицы мощности поглощенной дозы бета-излучения калориметром интегрального теплового потока и проведена их количественная оценка. Результаты приведены в табл. 3.

Таблица 3

Источники погрешности, неопределенности	$S_o \cdot 10^2$	$\theta_o \cdot 10^2$	$u_{oA} \cdot 10^2$	$u_{oB} \cdot 10^2$
Определение массы поглотителя калориметра, М		0,1		0,07
Измерение напряжения измерительного моста калориметра при облучении, $U_{\text{рад}}$	0,3	0,5	0,3	0,3
Измерение напряжения измерительного моста калориметра при калибровке, $U_{\text{эл}}$	0,2	0,5	0,2	0,3
Измерение мощности при градуировке, W	0,05	0,2	0,05	0,12
«Тепловой дефект» в материале поглотителя калориметра $k_{\text{тд}}$		0,2		0,12
Суммарные значения	0,4	1,2	0,4	0,7

Среднее квадратическое отклонение

среднего арифметического

0,4 %

Доверительная граница относительной систематической погрешности НСП ($P = 0,99$)

1,2 %

Суммарная стандартная неопределенность

0,7 %

Суммарная расширенная неопределенность при коэффициенте охвата $K = 2$

1,4 %

Калориметр помещается в рабочий объем облучательной установки бета-излучения БОИС-3. Для передачи единицы МПД служит графитовый фантом.

Управление работой установок фотонного, электронного и бета-излучения и проведение процесса измерений осуществляется с помощью персонального компьютера. Результаты измерений передаются в систему сбора и обработки данных ССД, где производится обработка результатов измерений с получением результирующего значения МПД и погрешности.

В табл. 4 приведены основные характеристики эталона: энергии излучений, диапазоны воспроизводимых значений МПД, их погрешности и неопределенности.

Таблица 4

Основные характеристики эталона ГЭТ 209-2014

Характеристики	Фотонное излучение	Электронное излучение	Бета-излучение
Диапазоны значений величин:			
Энергии излучения, МэВ	0,66 – Cs-137 1,25 – Co-60	от 3 до 10	до 2,3 (макс) Y-90+Sr-90
Мощности поглощенной дозы, Гр/с	от 0,3 до 10^3	от 10^2 до $2 \cdot 10^5$	от 0,3 до 10^2
СКО	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$
НСП	$6 \cdot 10^{-3}$	$2,8 \cdot 10^{-2}$	$1,4 \cdot 10^{-2}$
Суммарная расширенная неопределенность, $K=2$	$7 \cdot 10^{-3}$	$2,4 \cdot 10^{-2}$	$1,4 \cdot 10^{-2}$

При этом максимальное значение МПД, воспроизводимое эталоном (по электронному излучению), составляет $2 \cdot 10^5$ Гр/с.

Достоверность воспроизведения единицы МПД интенсивных излучений настоящим эталоном подтверждается результатами межлабораторных сличений разных стран – Европы, США, Канады, Японии.

В процессе разработки и создания данного эталона авторами был реализован ряд технических и научных решений, позволивших создать установки в составе эталона для воспроизведения и передачи единицы МПД интенсивного фотонного, электронного и бета-излучения калориметрическим методом с требуемой в современных радиационных технологиях погрешностью в следующих условиях: высокой температуры вследствие значительного радиационного разогрева элементов конструкции; необходимости калибровки калориметров по мощности в широком диапазоне от минимальных до максимальных значений МПД с сохранением точности; необходимости учета реального спектра излучения при расчете эффективной массы поглотителя и при передаче единицы МПД от эталона соподчиненным средствам измерений; отсутствия достоверной информации о значениях «теплового дефекта» в материалах поглотителей калориметров; необходимости учета

влияний флуктуаций тока ускорителя электронов на измеряемую МПД в процессе работы ускорителя. При создании эталона реализовано следующее.

1. В качестве основного материала поглотителей калориметров и фантомов использован реакторный чистый графит, обладающий необходимыми для калориметра качествами: электропроводностью, теплоемкостью и неограниченным радиационным ресурсом.

2. В качестве средства измерений теплового потока с поверхности поглотителей калориметров применялись разработанные и изготовленные по специальным технологиям сварные термобатарей с высокой чувствительностью (фотонное и электронное излучение) и пленочные термометры сопротивления малой массы, включенные в мостовую схему (бета-излучение).

3. Для калибровки калориметров по мощности тепловыделения применялись изготовленные по специальной технологии калибровочные нагреватели из пленочного отожженного нихрома, помещаемые в тело поглотителя калориметра. Такие нагреватели обладают малой массой по сравнению с массой поглотителя и способны рассеивать электрическую мощность в поглотителе калориметра до максимальных значений, воспроизводимых эталоном.

4. Измерены действующие спектры фотонного и электронного излучений в установках эталона, а также произведены расчеты действующих спектров фотонного, электронного и бета-излучений в этих установках (2). На основании полученных результатов произведены расчеты эффективной массы поглотителей калориметров фотонного и электронного излучений и произведена оценка погрешности передачи единицы МПД от эталона соподчиненным средствам измерений.

5. Проведен анализ литературных источников, проведены экспериментальные измерения и получены достоверные значения «теплового дефекта» в материалах, применяемых в радиационных технологиях - графите, полистироле, полиэтилене (3).

6. Для учета флуктуаций тока электронов работающего ускорителя при воспроизведении и передаче единицы МПД электронного излучения разработаны и применены монитор и интегратор тока ускоренных электронов, что позволило оценить и учесть погрешности от флуктуаций (4).

7. Разработана и применена конструкция калориметра бета-излучения со сменным поглотителем, позволяющая учесть значение ослабления бета-излучения в элементах конструкции калориметра.

Разработан и представлен проект государственной поверочной схемы для средств измерений МПД интенсивного фотонного, электронного и бета-излучений, согласно которой производится передача единицы МПД от ГПСЭ соподчиненным СИ (рис. 4).

Государственная поверочная схема для средств измерений мощности поглощенной дозы интенсивного фотонного, электронного и бета-излучений для радиационных технологий

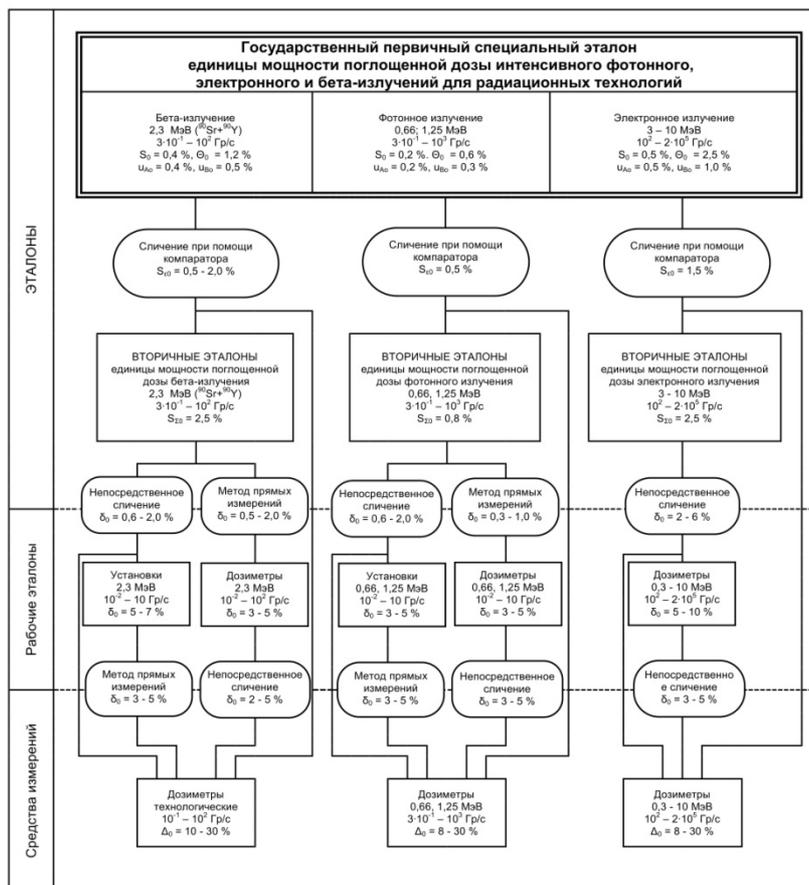


Рис. 4.

Государственный первичный специальный эталон (рис. 5-10) применяют для передачи единицы мощности поглощённой дозы интенсивного излучения вторичным эталонам методом сличением при помощи компаратора.

В качестве вторичных эталонов применяют эталонные установки, воспроизводящие единицу мощности поглощённой дозы интенсивного фотонного, электронного и бета-излучений для радиационных технологий. Средние квадратические отклонения результата поверки вторичных эталонов составляют от 0,5 до 1,5 %.

Вторичные эталоны применяют для передачи единицы мощности поглощённой дозы интенсивного фотонного, электронного и бета-излучений рабочим эталонам и рабочим средствам измерений методом прямых измерений или непосредственным сличением.

В качестве рабочих эталонов применяют радиационно-технологические

Альманах современной метрологии, 2015, №5

установки или дозиметры интенсивного фотонного, электронного и бета-излучений. Доверительные относительные погрешности δ_0 рабочих эталонов при доверительной вероятности 0,95 составляют от 3 до 8 %.

Рабочие эталоны применяют для поверки рабочих средств измерений методом прямых измерений или сравнением при помощи компаратора.

В качестве рабочих средств измерений применяют стандартные образцы и дозиметры интенсивного фотонного, электронного и бета-излучений для радиационных технологий.

Доверительные относительные погрешности (δ_0) рабочих СИ при доверительной вероятности 0,95 составляют от 7 до 15 %.

Созданный Государственный первичный специальный эталон, соподчиненные с ним вторичные, рабочие эталоны и рабочие средства измерений в совокупности с поверочной схемой обеспечивают единство измерений мощности поглощенной дозы интенсивных излучений в радиационных технологиях и создают условия для дальнейшего развития радиационных технологий. Дальнейшее совершенствование эталона должно быть направлено на повышение точности воспроизведения единиц и совершенствование методов передачи размера единиц.

Внешний вид установок, входящих в состав Государственного первичного специального эталона ГЭТ 209-2014



Рис. 5. Калориметр интегрального теплового потока с поглотителем из графита КТП-ГР-γ для воспроизведения единицы мощности поглощенной дозы фотонного излучения с энергией 0,66 МэВ (гамма-излучение Cs-137) и 1,25 МэВ (гамма-излучение Co-60) в графите



Рис. 6. Калориметр интегрального теплового потока с поглотителем из графита КТП-β для воспроизведения единицы мощности поглощенной дозы бета-излучения с граничной энергией 2,26 МэВ (бета-излучение Sr-90 + Y-90)



Рис. 7. Транспортируемая калориметрическая установка «ТКУГ-е» с дифференциальным калориметром теплового потока с поглотителем из графита КТП-е для воспроизведения единицы мощности поглощенной дозы электронного излучения в графите в диапазоне энергий от 3 до 10 МэВ



Рис. 8. Самозащищенная установка «MPX-гамма-100» (содержит 36 радионуклидных источников Co-60 активностью по $1000 \div 1100$ Ки)



Рис. 9. Самозащищенная установка «ЛМБ-гамма-1м» (содержит 24 радионуклидных источника Cs-137 суммарной активностью 3600 Ки).



Рис. 10. Самозащищенная бета-установка БОИС-3 (содержит 1 радионуклидный источник Sr-90 + Y-90 активностью 800 Ки)

Средства передачи единицы поглощенной дозы интенсивных потоков ионизирующего излучения

Лабораторией технологической дозиметрии разработаны пленочные (стандартные образцы), жидкостные и химические средства для измерения и передачи единицы поглощенной дозы интенсивных потоков ионизирующих излучений и методики калибровки этих средств:

1. Государственные стандартные образцы поглощенной дозы фотонного и электронного излучений (сополимер с феназиновым красителем):

- СО ПД(Ф)-5/50, сертификат об утверждении типа СО №1688, диапазон измерения поглощенной дозы 5 – 50 кГр;
- СО ПД(Ф)Р-30/200, сертификат об утверждении типа СО №1687, диапазон измерения поглощенной дозы 30 – 300 кГр;
- СО ПД(Ф)Р-5/50, сертификат об утверждении типа СО №1560, диапазон измерения поглощенной дозы 5 – 50 кГр.

2. Государственный стандартный образец поглощенной дозы фотонного и электронного излучений (сополимер с 4 диэтиламиноазобензоловым красителем) СО ПД(Э)-1/10, сертификат об утверждении типа СО №3532, диапазон измерения поглощенной дозы 1 – 10 кГр.

3. Государственный стандартный образец поглощенной дозы фотонного (силикатное стекло с добавкой никеля) СО ПД(ДТС)-0,05/10, сертификат об утверждении типа СО №1048, диапазон измерения поглощенной дозы 50 Гр – 10 кГр.

Разработанные в лаборатории стандартные образцы являются уникальными и единственными, по своим утвержденным методикам

градуируются на эталоне ГЭТ 209-2014 и используются для аттестации радиационно-технологических установок с электронными ускорителями и радионуклидными источниками

Заключение

Лаборатория технологической дозиметрии регулярно принимает участие в международных ключевых сличениях эталонов поглощенной дозы и мощности поглощенной дозы различных типов излучения совместно с ведущими метрологическими институтами в рамках МАГАТЭ. ФГУП «ВНИИФТРИ» является активным членом КООМЕТ по направлению «Ионизирующие излучения и радиактивность». Для участия в таких работах необходимы средства измерения, которые удовлетворяют требованиям международных стандартов.

В ведущих лабораториях мира ведутся работы по совершенствованию эталонной базы и средств передачи единицы поглощенной дозы, которые основаны на методе ЭПР-спектроскопии [6-8]. В мировой практике ЭПР-дозиметрия используется для реконструкции и идентификации при облучении продуктов питания, радиационной терапии, гарантии качества при радиационной обработке и археологических исследованиях. В таких исследованиях наиболее успешными материалами являются зубная эмаль, твердая ткань зуба, костная ткань, включая аминокислоту аланин. В отличие от пленочных дозиметров (которые могут быть использованы только один раз), твердотельные дозиметры могут быть использованы многократно без ограничения восстановлением облученных образцов посредством отжига [9]. В связи с этим в лаборатории технологической дозиметрии начаты работы и получены первые обнадеживающие результаты по разработке как новых пленочных, так и твердотельных дозиметров, основанных на изучении спектров электронного парамагнитного резонанса.

Литература

1. Генералова В.В., Громов А.А., Гурский М.Н. Обеспечение единства измерений в радиационных технологиях.-Менделеево: ВНИИФТРИ, 2007.
2. Алейкин В.В., Берлянд В.А., Генералова В.В., Тихонов Е.Г. Определение энергетического спектра гамма-излучения рабочего эталона единицы мощности поглощенной дозы фотонного излучения// Измер. техника, № 8, 1980.
3. Алейкин В.В., Берлянд В.А., Генералова В.В., Гурский М.Н. Определение «теплового дефекта» в различных материалах// Измер. техника, № 9, 1980.
4. Алейкин В.В., Берлянд В.А., Генералова В.В., Гурский М.Н. Образцовая калориметрическая установка для градуировки химических детекторов на

- радиационно-физических установках с ускорителями электронов второго поколения// Измер. техника, № 3, 1988.
5. Абдулов Р.А., Алейкин В.В., Генералова В.В., Громов А.А., Гурский М.Н., Емельяненко И.А., Жанжора А.П., Сысак А.Е., Тенишев В.П. Обеспечение единства измерений в радиационных технологиях// Альманах современной метрологии, №2, 2014.
 6. David A. Schauera, Akinori Iwasaki, Alexander A. Romanyukha, Harold M. Swartz, Sandro Onori. Electron paramagnetic resonance (EPR) in medical dosimetry// Radiation Measurements, 41 (2007), s. 117–S123.
 7. Mohamed A. Morsy. Simple EPR/Alanine Dosimeter for Medical Application// Open Journal of Radiology, 2012, 2, 120-125.
 8. Sayeda Eid. ESR. Dosimetric Study on Gamma Induced Radicals in DL-Ornithine Hydrochloride// Open Journal of Polymer Chemistry, 2013, 3, 23-28.
 9. Noori A. and Ziaie F. Investigation upon recycling of high energy electron beam irradiated alanine dosimeter// Indian Journal of Science and Technology, v. 4, № 12 (Dec 2011).