

УДК 539.16.07

**ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПЕРВИЧНЫЙ ЭТАЛОН ЕДИНИЦ
ПОГЛОЩЁННОЙ ДОЗЫ И МОЩНОСТИ
ПОГЛОЩЁННОЙ ДОЗЫ ФОТОННОГО
И ЭЛЕКТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЙ ГЭТ 38-2011.
СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ
РАЗВИТИЯ**

В.А. Берлянд

ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл.
bva110@mail.ru

В статье рассмотрено современное состояние Государственного первичного эталона единиц поглощённой дозы и мощности поглощённой дозы фотонного и электронного излучений ГЭТ 38-2011. Результаты его совершенствования с 1972 по 2019 г. Приведены результаты ключевых сличений с эталоном МБМВ, намечены перспективы развития.

The article considers the current state of the State primary standard of the units of absorbed dose and the absorbed dose rate of photon and electron radiation of GET 38-2011 and the results of its improvement from 1972 to 2019. The results of key comparisons with the standard BIPM are given, and development prospects are outlined.

Ключевые слова: эталон, поглощённая доза, калориметр, ионизационная камера, фотонное, электронное и протонное излучение, ключевые сличения.

Key words: standard, absorbed dose, calorimeter, ionization chamber, photon, electron and proton radiation, key comparisons.

Основной величиной, подлежащей измерению при использовании ионизирующих излучений в медицине, радиобиологии, радиационной технологии и пр., является поглощённая доза. Национальный первичный эталон поглощённой дозы фотонного ионизирующего излучения существует с 1972 г. [1]. Он воспроизводит единицу поглощённой дозы гамма-излучения ^{60}Co . В 1983 г. эталон был усовершенствован, были повышены его точностные характеристики [2]. За последующие годы в лучевой терапии широкое распространение получило использование ускорителей электронов, генерирующих как электронное, так и тормозное излучение. Соответственно появились дозиметры, предназначенные для измерения поглощённых доз этих видов излучения. В соответствии с необходимостью поверки дозиметров высокоэнергетического фотонного и электронного излучений во ВНИИФТРИ был смонтирован и запущен ускоритель электронов — микротрон, позволяющий получать пучки электронного и тормозного излучений.

Был разработан новый комплекс аппаратуры, который в 1995 г. был утверждён в качестве Государственного первичного эталона поглощённой дозы и мощности поглощённой дозы фотонного и электронного излучений.

При этом был расширен энергетический диапазон фотонного ионизирующего излучения (он составил 0,66–50 МэВ), и было реализовано воспроизведение единиц поглощённой дозы и мощности поглощённой дозы электронного излучения в диапазоне энергий 5–50 МэВ [3]. В 2011 г. была завершена очередная модернизация эталона, в результате чего был расширен энергетический диапазон фотонного излучения в сторону низких энергий до 15 кэВ.

В настоящее время Государственный первичный эталон состоит из комплекса следующих технических средств, вспомогательных устройств и специальных технических сооружений:

Основное оборудование:

- дифференциальный калориметр интегрального теплового потока КТП-2 для воспроизведения единиц поглощённой дозы и мощности поглощённой дозы фотонного излучения с энергией 1,25 МэВ (гамма-излучения Co-60);
- адиабатический калориметр РГЭ-2 для воспроизведения единиц поглощённой дозы и мощности поглощённой дозы фотонного излучения в диапазоне энергий от 50 кэВ до 50 МэВ и электронного излучения с энергией от 5 до 50 МэВ;
- адиабатический калориметр РГ-1 для воспроизведения единиц поглощённой дозы и мощности поглощённой дозы фотонного излучения в диапазоне энергий от 15 до 50 кэВ;
- графитовый фантом ГФН-1 для размещения напёрстковых ионизационных камер;
- водный фантом ВФН-5 с глубиной размещения напёрстковых ионизационных камер 5 г/см² (глубина определяется как произведение длины на плотность);
- водный фантом ВФН-2 с глубиной размещения напёрстковых ионизационных камер 2 г/см²;
- графитовый фантом ГФП-1 для размещения плоскопараллельных ионизационных камер на поверхности фантома;
- твердотельный фантом ТФ-1 (из полиметилметакрилата) для размещения плоскопараллельных ионизационных камер на поверхности фантома;
- компаратор (транспортабельный калориметр КТ-3, набор напёрстковых и плоскопараллельных ионизационных камер с универсальным дозиметром ДКС-101);
- плоскопараллельная ионизационная камера-монитор TW 34014;
- экстраполяционная графитовая ионизационная камера в графитовом фантоме ЭГИК-1.

Дополнительное оборудование:

- измерительная и регулирующая аппаратура: нановольтметр Keithley 2182A;
- источник тока Keithley 6221;
- система сбора и обработки данных ССД-2;
- мера сопротивления Р3030;
- турбомолекулярный откачной пост IImvac CDK 180;
- персональный компьютер.

Источники ионизирующего излучения:

- установка больших мощностей доз УБМД с радионуклидным источником Co-60;
- ускоритель электронов — микротрон;
- установка с рентгеновским аппаратом Isovolt Titan E.

Специальное инженерное сооружение — измерительный зал, в котором размещены источники ионизирующего излучения, с системой блокировок, предотвращающей возможность облучения персонала, стенами и окнами, обеспечивающими необходимый уровень ослабления ионизирующего излучения для безопасной работы персонала в смежных помещениях.

Воспроизведение единиц поглощённой дозы и мощности поглощённой дозы фотонного и электронного излучений осуществляется в эталоне абсолютным, калориметрическим методом. Достоинство калориметрического метода заключается в том, что энергия ионизирующего излучения поглощается в материале калориметра и поглощённая доза напрямую связана с ростом температуры. В идеале материалом калориметра должна быть вода. Однако у воды есть один серьёзный недостаток — так называемый «тепловой дефект». Под действием ионизирующего излучения в воде происходят химические реакции, которые сопровождаются поглощением или выделением тепла. Графит близок к воде по ряду важных параметров — таких как коэффициенты поглощения и рассеяния ионизирующих излучений. Кроме того, графит имеет низкую теплоёмкость и высокую теплопроводность, и практически вся поглощённая энергия излучения выделяется в виде тепла. А энергией, затрачиваемой на радиационно-химические реакции, можно пренебречь. Поэтому графит был рекомендован в качестве материала калориметра Международной Комиссией по радиационным единицам и измерениям [4]. Среднее значение поглощённой дозы в графите в поглотителе калориметра $D_{гр}$ определяется в соответствии с определением поглощённой дозы, приведённом в ICRU Report 33 (1980):

$$D_{гр} = E_{п} / m, \quad (1)$$

где $E_{п}$ — энергия ионизирующего излучения, поглощённая в поглотителе;
 m — масса поглотителя.

Для того, чтобы осуществить переход от поглощённой дозы в графите к дозе в воде с максимально возможной точностью необходимо воспроизводить единицу поглощённой дозы в точке гомогенного графитового фантома. Поэтому должно быть минимизировано использование материалов, отличных от графита, особенно в поглотителе, а форма элементов калориметра и применяемые зазоры между элементами должны минимально искажать процессы поглощения и рассеяния излучения.

Основу эталона составляют 3 калориметра, позволяющие перекрыть энергетический диапазон фотонного излучения в диапазоне энергий от 50 кэВ до 50 МэВ и электронного излучения с энергией от 5 до 50 МэВ. В первичном эталоне используются калориметры двух типов — адиабатические и интегрального теплового потока.

Адиабатические калориметры

Калориметр РГЭ-2 предназначен для воспроизведения единиц дозы и мощности дозы гамма-излучения Co-60 (1,25 МэВ), рентгеновского и тормозного излучения в диапазоне энергий от 50 кэВ до 50 МэВ и электронного излучения с энергией от 5 до 50 МэВ. Калориметр РГЭ-2 в разрезе показан на рис. 1.

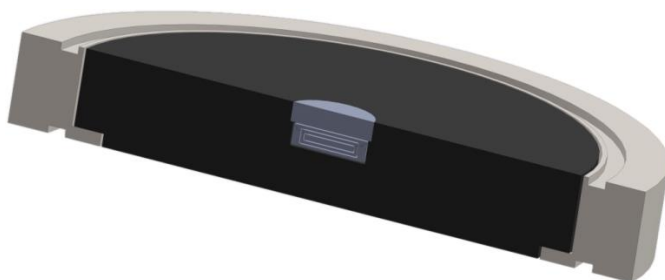


Рис. 1. Калориметр РГЭ-2 в разрезе

Калориметр состоит из поглотителя, представляющего собой графитовый диск диаметром 20 мм и толщиной 2 мм. Поглотитель окружён двумя оболочками, изготовленными из того же графита, и частью графитового фантома. Возрастание температуры поглотителя калориметра вследствие облучения мало. Поглощённая доза 1 Гр приводит к росту температуры поглотителя при отсутствии теплообмена с окружающими элементами (адиабатический режим) на 1,4 мК. Поэтому для обеспечения адиабатического режима предприняты специальные меры. Для уменьшения теплообмена между элементами калориметра они отделены друг от друга вакуумными зазорами. Ширина вакуумных зазоров 0,5 мм — это некий компромисс для соблюдения, с одной стороны, большого теплового сопротивления между элемента-

ми калориметра, а с другой стороны — минимального искажения поля излучения вследствие нарушения гомогенности графитового фантома. Для уменьшения теплового излучения поверхности элементов калориметра, за исключением поглотителя, покрыты тонкой (0,006 мм) алюминизированной лавсановой плёнкой. В поглотитель калориметра (на средину толщины) вмонтированы два микротермистора Весо диаметром 0,12 мм номиналом 20 кОм при 20 °С. ТКС термисторов — 3,9 % / °С. Один из них служит для измерения температуры, другой в качестве нагревательного элемента для градуировки калориметра с помощью выделяемой в термисторе мощности электрического тока. Использование термистора вместо проволочного нагревательного элемента позволяет минимизировать содержание инородных материалов в поглотителе калориметра. Поглотитель калориметра окружает первая оболочка, снабжённая проволочным нагревательным элементом. Назначение её — уменьшать температурный дрейф поглотителя. В процессе облучения первая оболочка нагревается с такой же скоростью, что и поглотитель, создавая, таким образом, адиабатические условия. Вторая оболочка снабжена нагревательным элементом и термистором для контроля температуры. Температура этой оболочки регулируется с помощью терморегулятора. Указанные элементы калориметра размещаются в слое графитового фантома, который в свою очередь размещён в металлической обечайке, снабжённой разъёмом и вакуумным фланцем. По торцам обечайки находится майларовая плёнка, обеспечивающая герметичность внутреннего объёма. Остальные части графитового фантома наращиваются спереди и сзади центральной части калориметра. При этом толщина переднего добавочного слоя может варьироваться с тем, чтобы в зависимости от энергии излучения проводить измерения на разных глубинах. Общий вид калориметра в графитовом фантоме показан на рис. 2.

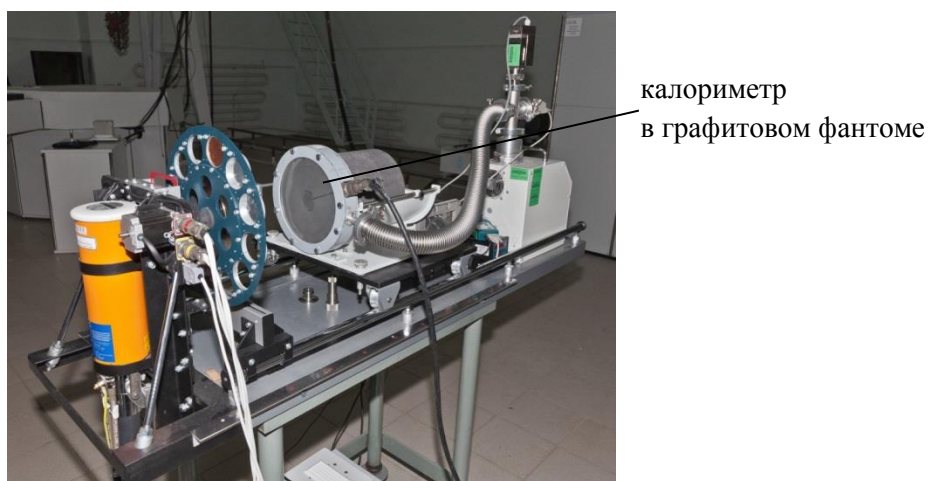


Рис. 2.

Один из термисторов поглотителя, предназначенный для измерения изменения температуры поглотителя, включён в плечо мостовой схемы. Питание мостовой схемы осуществляется с помощью источника тока Keithley 6221. Напряжение с мостовой схемы измеряется нановольтметром Keithley 2182A. Управление работой всех калориметров осуществляется с помощью системы сбора и обработки данных ССД-2. Внешний вид ССД-2 с нановольтметром и источником тока представлен на рис. 3.



Рис. 3.

Для определения поглощённой дозы в графите $D_{гр}$, отнесённой к точке, совпадающей с геометрическим центром поглотителя калориметра, сравнивают изменение сопротивления «измерительного» термистора поглотителя при радиационном и калибровочном нагреве с помощью электрического тока. А поскольку изменение сопротивления термистора, включённого в мостовую схему, прямо пропорционально изменению напряжения в диагонали моста, то

$$D_{гр} = \frac{I \cdot U_T \cdot t}{M_{эф}} \cdot \frac{(\Delta U_M)_{рад}}{(\Delta U_M)_{эл} \cdot Pk_i}, \quad (2)$$

где I — сила электрического тока, протекающего через нагревательный элемент поглотителя калориметра во время градуировки калориметра (сила тока определяется по падению напряжения на мере сопротивления Р3030);

U_T — падение напряжения на нагревательном элементе;

t — время выделения электрической мощности в поглотителе калориметра;

$(\Delta U_M)_{рад}$ и $(\Delta U_M)_{эл}$ — изменение напряжения с мостовой схемы при облучении ионизирующим излучением и при градуировке калориметра электрическим током;

Πk_i — произведение поправочных коэффициентов: $k_{вз}$ — коэффициент, учитывающий искажение флюенса фотонов вакуумными зазорами внутри калориметра; $k_{тп}$ — коэффициент, учитывающий потери тепла от поглотителя по подводящим проводам; $k_{гр}$ — коэффициент, учитывающий градиент мощности поглощённой дозы в радиальном и аксиальном направлении в поглотителе; $k_{тд}$ — коэффициент, учитывающий «тепловой дефект» в материалах, входящих в состав поглотителя калориметра. «Тепловой дефект» — это относительная доля поглощённой энергии ионизирующего излучения, которая затрачивается либо дополнительно выделяется в результате радиационно-химических реакций, протекающих при взаимодействии излучения с веществом.

$M_{эф}$ — эффективная масса поглотителя калориметра.

Эффективная масса поглотителя калориметра определяется из соотношений:

для фотонного излучения

$$M_{эф} = m_{гр} + \sum m_i \cdot \frac{(\mu_{en,m})_i}{(\mu_{en,m})_{гр}}; \quad (3)$$

для электронного излучения

$$M_{эф} = m_{гр} + \sum m_i \cdot \frac{(S_m)_i}{(S_m)_{гр}}, \quad (4)$$

где $m_{гр}$ — масса графитовой таблетки, образующей поглотитель;

m_i — масса i -го материала, входящего как примесь в состав поглотителя (термистор, подводящие провода, клей, изолятор);

$(\mu_{en,m})_i / (\mu_{en,m})_{гр}$ — отношение массовых коэффициентов поглощения энергии i -го материала и графита, усреднённых по действующему спектру фотонного излучения;

$(S_m)_i / (S_m)_{гр}$ — отношение массовых тормозных способностей i -го материала и графита, усреднённых по спектру электронного излучения.

Усреднение массовых коэффициентов энергии по спектру фотонного излучения осуществляется по формуле

$$\frac{\bar{\mu}_{en}}{\rho} = \frac{I}{\Psi} \int_0^{E_{max}} \Psi_E(E) \frac{\mu_{en}(E)}{\rho} dE, \quad (5)$$

где Ψ — энергетический флюенс фотонного излучения.

Введя обозначение $N_{эк} = IU_m t / (\Delta U_M)_{эл}$, соотношение (1) можно переписать в виде:

$$D_{гр} = \frac{N_{эк}}{M_{эф}} \cdot (\Delta U_M)_{рад} \cdot \Pi k_i, \quad (6)$$

где $N_{эк}$ — чувствительность калориметра, определяемая путём электрической калибровки.

При градуировке калориметра с помощью электрического тока в поглотителе и в первой оболочке, окружающей поглотитель, должна выделяться одинаковая мощность на единицу массы. То есть должно выполняться условие:

$$\frac{I_{\text{погл}}^2 R_{\text{погл}}}{M_{\text{погл}}} = \frac{I_{\text{погл}}^2 R_{\text{обол}}}{M_{\text{обол}}}, \quad (7)$$

где $I_{\text{погл}}$ и $I_{\text{обол}}$ — сила тока, протекающего через нагревательный элемент поглотителя и первой оболочки соответственно;

$R_{\text{погл}}$ и $R_{\text{обол}}$ — сопротивления нагревательного элемента поглотителя и первой оболочки соответственно;

$M_{\text{погл}}$ и $M_{\text{обол}}$ — массы поглотителя и оболочки соответственно.

Сила электрического тока, протекающего через нагревательный элемент поглотителя калориметра во время градуировки калориметра, I определяется по падению напряжения на эталонной мере сопротивления Р3030. Электрическая мощность точно измеряется только в цепи поглотителя.

Кривая калориметрического цикла приведена на рис. 4. Она состоит из трёх участков. Первый и третий участки — это температурный дрейф поглотителя калориметра до и после нагрева поглотителя (излучением или электрическим током). Второй участок — это нагрев в течение времени t . Калориметрические измерения проводятся в автоматическом режиме под управлением программы ССД-2.

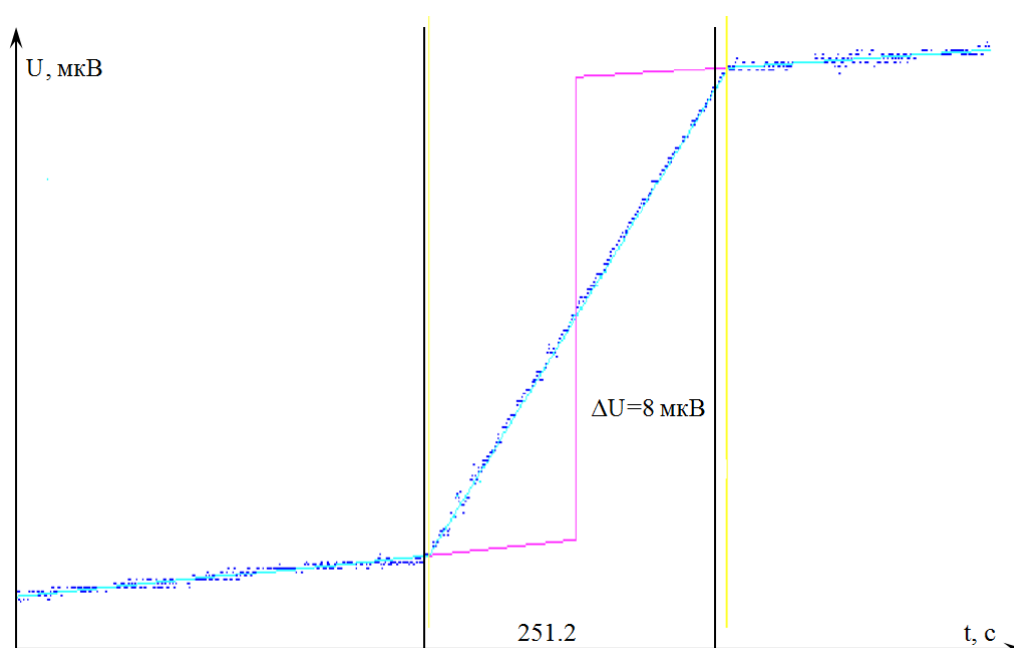


Рис. 4. Кривая калориметрического цикла

Калориметр РГ-1 предназначен для воспроизведения единиц дозы и мощности дозы рентгеновского излучения с энергией фотонов от 15 до 50 кэВ. Конструкция центральной части калориметра аналогична конструкции калориметра РГЭ-2. Только для уменьшения поглощения рентгеновского излучения поглотитель калориметра изготовлен из тонкого графита, торцы первой оболочки и торец второй оболочки, направленной в сторону излучения, также изготовлены из граффлекса. Калориметр РГ-1 работает под управлением системы сбора и обработки данных ССД-2. Общий вид калориметра представлен на рис. 5.

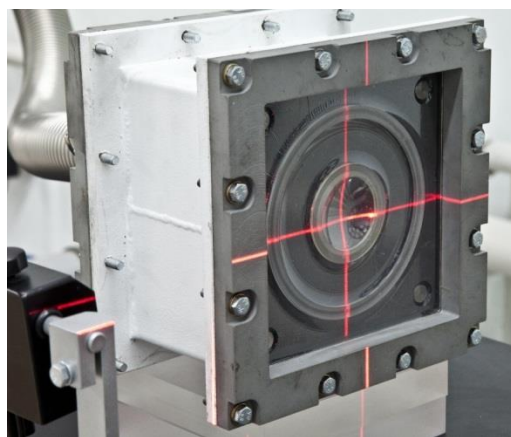


Рис. 5.

Дифференциальный калориметр теплового потока КТП-2

Этот калориметр был введен в состав первичного эталона ГЭТ 38-95 в 1995 г., и его конструкция не претерпела изменений. Дифференциальный калориметр состоит из двух идентичных одиночных калориметров. Одиночный калориметр содержит поглотитель в форме таблетки из графита. Таблетка состоит из двух половинок диаметром 30 мм и толщиной 3 мм, между которыми вмонтирован нагревательный элемент из манганинового провода диаметром 0.03 мм. Поглотитель окружен со всех сторон миниатюрной термобатареей, содержащей несколько сотен термопар. Два таких идентичных калориметра теплового потока с одинаковыми массами поглотителей, количеством термопар в термобатареях и постоянными времени, соединенных по дифференциальной схеме, помещены в графитовый фантом размерами 400×300×300 мм. Здесь фантом выполняет функции оболочки калориметров. Благодаря тому, что термобатарея покрывает большую часть поверхности поглотителя, основная часть теплового потока от поглотителя к оболочке проходит через термопары и лишь небольшая часть (~2 %) — через воздушные зазоры. При этом измеряется перепад температуры между поглотителем

и оболочкой, усреднённый по всей поверхности. Термо-ЭДС термобатареи U в стационарном режиме прямо пропорциональна мощности тепловыделения W в поглотителе калориметра, независимо от теплоёмкости поглотителя и распределения температур внутри него или на его поверхности. Один из калориметров играет роль рабочего, другой — опорного. Во время измерения рабочий калориметр находится в центре коллимированного пучка излучения, опорный калориметр — вне его. Для уменьшения влияния на показания калориметра флуктуаций температуры окружающей среды фантом окружён слоем теплоизоляции и помещён в жёсткий кожух. Внешний вид калориметра теплового потока представлен на рис. 6.



Рис. 6.

Мощность поглощённой дозы в графите в точке графитового фантома, совпадающей с центром поглотителя калориметра, определяют из соотношения:

$$D = \frac{I^2 \cdot R_n}{M_{\text{эф}}} \cdot \frac{(\Delta U_m)_{\text{рад}}}{(\Delta U_m)} \cdot \text{П}k_i, \quad (8)$$

где I — сила тока, протекающего через нагревательный элемент;

R_n — сопротивление нагревательного элемента;

$M_{\text{эф}}$ — эффективная масса поглотителя калориметра;

$(\Delta U_m)_{\text{рад}}$ и $(\Delta U_m)_{\text{эл}}$ — изменение напряжения на термобатареи при облучении ионизирующим излучением и при градуировке калориметра электрическим током;

Pk_i — произведение поправочных коэффициентов: $k_{вз}$ — коэффициент, учитывающий искажение флюенса фотонов воздушными зазорами внутри калориметра; $k_{тп}$ — коэффициент, учитывающий потери тепла от поглотителя по подводящим проводам; $k_{гр}$ — коэффициент, учитывающий градиент мощности поглощённой дозы в радиальном и аксиальном направлении в поглотителе; $k_{тб}$ — коэффициент, учитывающий влияние термобатареи; $k_{тд}$ — коэффициент, учитывающий «тепловой дефект» в материалах, входящих в состав поглотителя калориметра.

Транспортабельный калориметр КТ-3

Портативный калориметр адиабатического типа позволяет воспроизводить единицы поглощённой дозы и мощности поглощённой дозы в полях излучения ускорителей различных типов. Конструкция калориметра показана на рис. 8. Поглотитель калориметра — графитовый диск диаметром 20 мм и толщиной 2 мм. Внутри него вмонтированы два миниатюрных термистора сопротивлением 2,7 кОм (при 20 °С). Поглотитель окружён двумя оболочками с толщиной графитовых стенок 0,8 мм. В первую оболочку вмонтирован проволочный нагревательный элемент, во вторую — термистор и нагревательный элемент. Поглотитель и оболочки разделены вакуумными зазорами шириной 0,5 мм. Калориметр помещён в корпус из оргстекла. Толщина стенки корпуса со стороны падения пучка излучения равна 1 мм. Внутри калориметра поддерживается вакуум. Внешний вид калориметра представлен на рис. 7.

Калориметр размещается в водном фантоме на различных расстояниях от поверхности, направленной к источнику излучения. Значение поглощённой дозы определяется по соотношению (2). Вся система измерения и регулирования для всех калориметров общая.



Рис. 7. Транспортабельный калориметр КТ-3

Источники ионизирующего излучения

Установка больших мощностей доз УБМД

Установка содержит радионуклидный источник Co-60 активностью $2 \cdot 10^{14}$ Бк ($6 \cdot 10^3$ Ки). Установка снабжена коническим коллиматором и заслонкой, перекрывающей пучок излучения. На измерительной линейке длиной 8 м установлена тележка, на которой размещаются калориметр и фантомы. Внешний вид установки представлен на рис. 8.



Рис. 8.

Ускоритель электронов — микротрон

Диапазон энергий ускоренных электронов и диапазон граничных энергий тормозного излучения (5–25 МэВ). Внешний вид ускорителя представлен на рис. 9.



Рис. 9.

Установка с рентгеновским аппаратом Isovolt Titan E

Трубка рентгеновского аппарата установлена на специальном столе. На столе смонтированы: система формирования поля излучения заданного качества, электромагнитный затвор, перекрывающий пучок излучения, монитор — проходная плоскопараллельная ионизационная камера, лазерная система юстировки, линейка и тележка, на которой размещаются средства измерений. Система формирования поля излучения состоит из коллиматора, определяющего размеры поля излучения и диска с набором фильтров. Значение высокого напряжения, материал и толщина фильтра определяют энергетические характеристики — качество пучка. Смена фильтров и управление электромагнитной заслонкой осуществляются с пульта управления. Внешний вид рентгеновского аппарата с инфраструктурой представлен на рис. 10.



Рис. 10.

Результаты исследований первичного эталона

В процессе очередного усовершенствования эталона проводились метрологические исследования характеристик эталона, анализ составляющих неисключённых остатков систематических погрешностей, а также исследования, направленные на выяснение возможных неучтённых систематических погрешностей.

При этом были проведены:

- исследования возмущения флюенса фотонного излучения вакуумными и воздушными зазорами между элементами калориметра;
- исследования энергетического спектра фотонного излучения;
- исследования возмущения флюенса фотонного излучения ионизационной камерой, размещённой в фантоме;

- исследования утечек тепла по подводящим проводам;
- исследования влияния термобатареи на показания калориметра интегрального теплового потока.

Исследования возмущения флюенса фотонного излучения вакуумными зазорами в калориметре проводились экспериментальным методом и расчётами методом Монте-Карло по программе (расчёты выполнялись отделом ядерных и космических исследований НИИЯФ МГУ). Экспериментальные исследования проводились с помощью плоскопараллельной ионизационной камеры, размещаемой в фантоме. Измерения проводились с камерой, размещённой в фантоме без зазора, и с камерой, окружённой зазором шириной равной сумме всех зазоров в калориметре. В этом случае на поверхности фантома добавлялся дополнительный слой графита толщиной равной ширине зазоров. В результате эксперимента для гамма-излучения Co-60 значение поправки на эффект возмущения флюенса зазорами калориметра составил

$$k_{вз} = 1,0065 \pm 0,0013.$$

В результате расчёта методом Монте-Карло получено значение:

$$k_{вз} = 1,0071.$$

Исследование энергетического спектра фотонного излучения проводилось для гамма-излучения Co-60 и рентгеновского излучения. Ввиду очень высокой плотности потока гамма-излучения от установки УБМД использовать спектрометр для определения спектра излучения в фантоме невозможно. Реальный энергетический спектр был восстановлен по результатам измерений мощностей доз в материалах разного состава с использованием различной зависимости от энергии массовых коэффициентов поглощения для различных материалов:

$$D_k = \int \Psi(E) \mu_{en} / \rho(E, Z_k) dE, \quad (9)$$

где D_k — мощность дозы в к-м материале;

$\Psi(E)$ — плотность потока гамма-квантов;

$\mu_{en} / \rho(E, Z_k)$ — массовый коэффициент поглощения энергии для к-го материала.

Мощность поглощённой дозы в разных материалах измерялась с помощью специально разработанного дифференциального калориметра теплового потока со сменными поглотителями. Мощность поглощённой дозы была определена для 7 материалов с разными атомными номерами. В результате решения уравнения (8) был восстановлен энергетический спектр фотонного излучения в точке графитового фантома [5]. По полученному спектру с использованием соотношения (4) были получены значения массовых коэффициентов поглощения для графита и воды. Для отношения массовых коэффициентов поглощения энергии воды и графита получено значение

$$(\mu_{en} / \rho)^B / (\mu_{en} / \rho)^{GP} = 1,1125.$$

Энергетический спектр рентгеновского излучения определялся с использованием спектрометра АМРТЕК на основе теллурида кадмия (CdTe) модель X-123. Восстановление реального спектра осуществлялось по программе «СПЕКТР» ФГУП «ВНИИФТРИ». Были учтены:

- энергетическая зависимость эффективности регистрации фотонного излучения [отсчёт/фотон];
- наличие комптоновского рассеяния для энергии квантов более 20 кэВ;
- обратное рассеяние от стенок оболочки калориметра (определено экспериментально с использованием источников на основе нуклидов Fe-55, Co-57, Cd-109, Am-241).

Ввиду большой интенсивности излучения от рентгеновского аппарата измерения со спектрометром проводились с использованием коллиматора. Для полученных спектров рассчитаны значения массовых коэффициентов поглощения для разных материалов.

Исследования возмущения флюенса фотонного излучения ионизационной камерой, размещённой в фантоме, проводились с применением специально разработанной ионизационной камеры с минимальным зазором между потенциальным и собирающим электродом.

Поправка, учитывающая утечку тепла по подводящим проводам, была оценена на основе анализа литературных данных, в которых приведены расчёты для калориметров аналогичной конструкции. Значение поправки равно: $k_{\text{тп}} = 0,9989$.

Исследования влияния термобатареи на показания калориметра интегрального теплового потока проводилось экспериментальным методом. Для этой цели был изготовлен специальный калориметр интегрального теплового потока с полым графитовым поглотителем, внутрь которого можно помещать добавочный слой графита. Провели измерения в одних и тех же условиях с полым и сплошным поглотителем. Получили систему из двух уравнений. Решение этой системы уравнений дало значение $k_{\text{тб}} = 0,991 \pm 0,001$.

Анализ погрешностей (неопределённостей) воспроизведения единиц

Погрешность воспроизведения поглощённой дозы и мощности поглощённой дозы фотонного и электронного излучений оценивают следующим образом:

- в качестве оценки случайной погрешности принимается относительное среднее квадратическое отклонение (СКО) среднего арифметического результата воспроизведения единицы S при 20 независимых измерениях:

$$S = 1/D \sqrt{\sum (D_i - D)^2 / n(n-1)}, \quad (10)$$

где D_i — i -й результат наблюдения поглощённой дозы; D — среднее арифметическое полученных результатов измерений; n — число наблюдений;

- неисклѹченный остаток доверительной относительной систематической погрешности (НСП) при доверительной вероятности $P = 0,99$ рассчитывается по формуле:

$$\theta_D = 1,4 \sqrt{\frac{1}{D_n^2} \sum_i \left(\frac{\partial D_n}{\partial \xi_i} \xi_i \right)^2 E_{\xi_i}^2}, \quad (11)$$

где ξ_i — величины, входящие в уравнение измерения для величины D .

Значение дозы (мощности дозы) для адиабатического калориметра определяется по соотношению (2). Поскольку ток, протекающий через нагревательный элемент, определяется по падению напряжения U_{mc} на мере сопротивления Р3030, то соотношение (2) можно записать в виде:

$$D_{гр} = \frac{U_{mc} U_T t}{M_{эф} R_{mc}} \cdot \frac{(\Delta U_M)_{рад}}{(\Delta U_M)_{эл}} \cdot \Pi k_i, \quad (12)$$

где R_{mc} — сопротивление меры Р3030.

В таблице 1 приведены составляющие погрешности и неопределѐнности при воспроизведении единицы поглощенной дозы адиабатическим калориметром РГЭ-2.

Таблица 1

Источники погрешности, неопределѐнности	$S_0 \cdot 10^2$	$\theta_0 \cdot 10^2$	$u_{0A} \cdot 10^2$	$u_{0B} \cdot 10^2$
$N_{эк}$		0,15		0,09
$M_{эф}$		0,05		0,03
$(\Delta U_M)_{рад}$	0,2	0,05	0,2	0,03
$k_{вз}$		0,13		0,08
$k_{тп}$		0,12		0,07
$k_{гр}$		0,05		0,03
$k_{тд}$		0,01		0,01
Суммарные значения	0,2	0,25	0,2	0,15

Суммарный остаток неисклѹченной относительной систематической погрешности НСП ($P = 0,99$) 0,0035

Суммарная расширенная неопределѐнность с коэффициентом охвата $k = 2$ 0,005

В таблице 2 приведены составляющие погрешности и неопределѐнности при воспроизведении единицы поглощенной дозы адиабатическим калориметром РГ-1.

Таблица 2

Источники погрешности, неопределённости	$S_0 \cdot 10^2$	$\theta_0 \cdot 10^2$	$u_{\theta A} \cdot 10^2$	$u_{\theta B} \cdot 10^2$
$N_{\text{эк}}$		0,15		0,09
$M_{\text{эф}}$		0,25		0,07
$(\Delta U_M)_{\text{рад}}$	0,2	0,05	0,2	0,03
$k_{\text{вз}}$		0,30		0,17
$k_{\text{тп}}$		0,15		0,09
$k_{\text{гр}}$		0,05		0,03
$k_{\text{тд}}$		0,02		0,01
Суммарные значения	0,2	0,45	0,2	0,23

Суммарный остаток неисключённой
относительной систематической погрешности 0,0063
НСП ($P = 0,99$)
Суммарная расширенная неопределённость
с коэффициентом охвата $k = 2$ 0,0066

В таблице 3 приведены составляющие погрешности и неопределённости при воспроизведении единицы поглощённой дозы калориметром интегрального теплового потока.

Таблица 3

Источники погрешности, неопределённости	$S_0 \cdot 10^2$	$\theta_0 \cdot 10^2$	$u_{\theta A} \cdot 10^2$	$u_{\theta B} \cdot 10^2$
$N_{\text{эк}}$		0,12		0,09
$M_{\text{эф}}$		0,03		0,07
$(\Delta U_M)_{\text{рад}}$	0,2	0,05	0,2	0,03
$k_{\text{вз}}$		0,08		0,17
$k_{\text{тп}}$		0,12		0,09
$k_{\text{гр}}$		0,05		0,03
$k_{\text{тд}}$		0,01		0,01
$k_{\text{тб}}$		0,12		
Суммарные значения	0,2	0,24	0,2	0,23

Суммарный остаток неисключённой
относительной систематической погрешности 0,35 %
НСП ($P = 0,99$)
Суммарная расширенная неопределённость
с коэффициентом охвата $k = 2$ 0,5 %

Результаты международных сличений первичного эталона

В 2001 и 2009 гг. первичный эталон участвовал в ключевых сличениях (6, 7), которые проводились на базе МБМВ (Международное Бюро мер и весов). Сличения (BIPM.R I(I)-K4) проводились по поглощённой дозе в воде гамма-излучения Co-60 косвенным методом с использованием двух напёрстковых ионизационных камер, входящих в состав первичного эталона.

При сличениях эталонов ВНИИФТРИ и МБМВ калибровочные факторы $N_{D,v}$ для двух ионизационных камер находили из выражения

$$N_{D,v, \text{лаб}} = D_{v, \text{лаб}} / I_{\text{лаб}},$$

где $D_{v, \text{лаб}}$, $I_{\text{лаб}}$ — измеренные мощность поглощённой дозы в воде и сила ионизационного тока камеры.

За результат сличений принимаются отношения калибровочных коэффициентов ионизационных камер «ВНИИФТРИ», полученных на эталоне ГЭТ 38-95 и на эталоне BIPM: $R_{D,v} = N_{D,v, \text{ВНИИФТРИ}} / N_{D,v, \text{МБМВ}}$.

На рис. 11 приведены результаты ключевых сличений ВНИИФТРИ и других участников сличений. Все результаты в соответствии с договорённостью участников сличений приведены по отношению к данным BIPM.

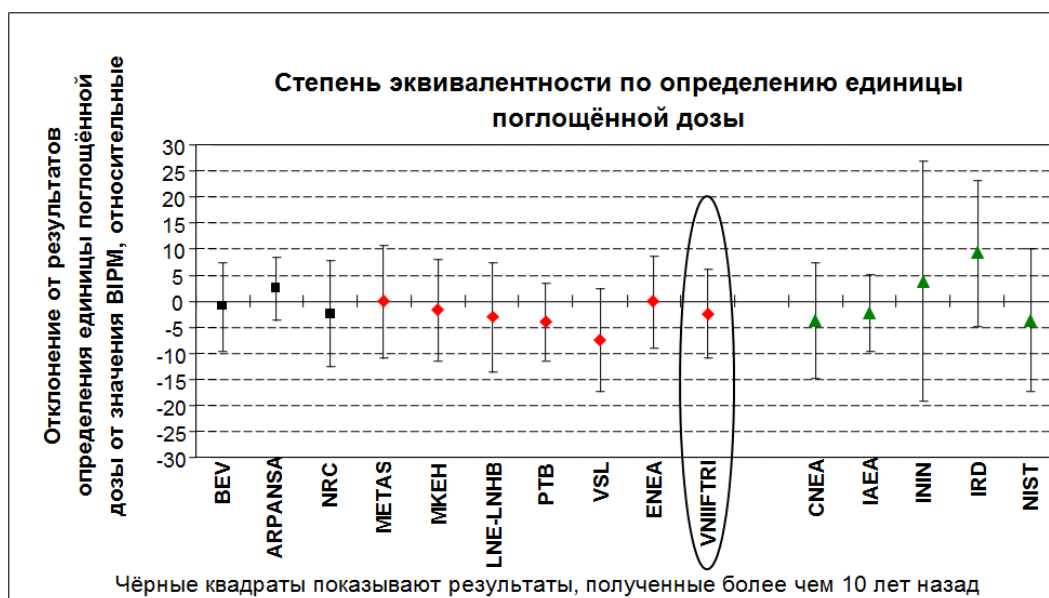


Рис. 11.

Первичные эталоны поглощённой дозы ВНИИФТРИ и МБМВ согласуются ($R_{D,v} = 0,9976$, $u_c = 0,0043$) в пределах неопределённости результата сличений.

Перспективы дальнейшего совершенствования эталона

Одним из перспективных направлений в терапии онкологических пациентов является использование протонного излучения. В настоящее время протонные ускорители, специально разработанные для лучевой терапии, используются в клиниках в Обнинске, Протвино, С.-Петербурге. Готовится к запуску ускоритель протонов в Димитровграде. Поэтому одна из перспектив развития эталона — это расширение номенклатуры видов ионизирующего излучения первичного эталона — воспроизведение единиц поглощённой дозы и мощности поглощённой дозы протонного излучения.

Литература

1. Брегадзе Ю.И., Исаев Б.М., Тултаев А.В., Сильченко А.П., Коршиков А.В. Государственный первичный эталон единицы мощности поглощённой дозы фотонного ионизирующего излучения // Измерительная техника. 1973. № 3. С. 3–7.
2. Берлянд В.А., Брегадзе Ю.И. Государственный первичный эталон единицы мощности поглощённой дозы фотонного ионизирующего излучения // Измерительная техника. 1985. № 4.
3. Берлянд А.В., Берлянд В.А., Брегадзе Ю.И. Государственный первичный эталон единицы мощности поглощённой дозы фотонного и электронного излучений, его совершенствование и результаты ключевых сличений // Измерительная техника. 2010. № 2.
4. International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU). Report 14 (ICRU 1969).
5. Берлянд В.А., Брегадзе Ю.И., Цуриев С.М.Ш. Рабочий эталон единицы мощности поглощённой дозы фотонного ионизирующего излучения в воде // Измерительная техника. 1986. № 4.
6. Allisy-Roberts P.J., Kessler C., Burns D.T., Berlyand V., Berlyand A. Comparison of the standards for absorbed dose to water of the VNIIFTRI, Russia and the BIPM in ^{60}Co γ rays // Metrologia. 2010. 47.