

## ПЕРВИЧНАЯ КАЛИБРОВКА ИСТОЧНИКОВ ФОТОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ HDR-БРАХИТЕРАПИИ В СООТВЕТСТВИИ С МЕЖДУНАРОДНЫМИ РЕКОМЕНДАЦИЯМИ

М.А. Кузнецов<sup>1</sup>, О.В. Козлов<sup>2</sup>, А.А. Федянина<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ООО “Медскан”

<sup>2</sup> Российский онкологический научный центр им. Н.Н. Блохина, Москва

Рассмотрены методы дозиметрии источников ионизирующего фотонного излучения, применяемые в HDR-брахитерапии с целью установления величины опорной мощности воздушной кермы при первичной калибровке в соответствии с нормативными международными рекомендациями.

Ключевые слова: брахитерапия, гарантия качества, источники излучения, дозиметрия, международные нормативы

### Введение

Контактная лучевая терапия (брахитерапия) широко применяется в современной клинической практике как в самостоятельном варианте, так и в сочетании с дистанционной лучевой терапией (ДЛТ). В настоящее время в России наиболее распространена методика брахитерапии в диапазоне высокой мощности дозы (HDR) с временной экспозицией закрытых источников ионизирующего излучения (ИИИ) по методу *remote afterloading*. Метод подразумевает размещение аппликаторов в непосредственной близости от мишени с последующим автоматическим дистанционным вводом источников в аппликаторы. Для осуществления данного метода необходимо иметь специальное оборудование, позволяющее подавать источники в аппликаторы в соответствии с предварительно составленным планом облучения.

К сожалению, в настоящее время в Российской Федерации не существует национальных рекомендаций, касающихся гарантии качества брахитерапии. В связи с этим мы считаем полезным сделать обзор существующих нор-

мативных международных рекомендаций, посвященных данной проблематике [1–3].

Несмотря на то, что сменный источник сопровождается паспортом, в котором указано значение мощности кермы в воздухе, измеренное на расстоянии 1 м от ИИИ (т.наз. опорная мощность воздушной кермы), необходимо произвести независимые измерения. Расхождение измеренной величины опорной мощности воздушной кермы не должно превышать 5 % с ее паспортным значением, в противном случае следует связаться с поставщиком источников. Опорная мощность воздушной кермы может быть измерена тремя различными способами с использованием ионизационной камеры (ИК):

1. ИК в воздухе;
2. ИК колодезного типа;
3. ИК в фантоме.

Оптимальным методом проведения калибровки источника считается измерение с использованием ИК колодезного типа. Однако если это оборудование отсутствует, следует использовать другие методы. Далее в тексте слово “опорная” в определении измеряемой величины будет опущено.

## Измерение мощности воздушной кермы в воздухе

Применение данного метода является наименее желательным, т.к. установление значения величины мощности кермы в воздухе сопряжено со значительными трудностями из-за необходимости учитывать при измерениях значительное количество поправок и связанных с этим погрешностей. Тем не менее, если нет других альтернатив, ИИИ следует калибровать с использованием данной методики.

Для ИИИ HDR рекомендовано применение ИК с чувствительным объемом больше  $0,5 \text{ см}^3$  (например, ИК Baldwin-Farmer объемом  $0,6 \text{ см}^3$ ).

Значение величины мощности кермы в воздухе  $\dot{K}_R$  определяется следующим образом:

$$\dot{K}_R = N_K \cdot \left( \frac{M_U}{t} \right) \cdot k_{air} \cdot k_{scatt} \cdot k_n \cdot \left( \frac{d}{d_{ref}} \right)^2, \quad (1)$$

где:  $N_K$  – калибровочный фактор ИК;  $M_U$  – собранный за время  $t$  заряд с поправкой на температуру, давление, полярность, рекомбинацию и время доставки источника из положения “хранение”;  $k_{air}$  – поправка на ослабление;  $k_{scatt}$  – поправка на рассеяние;  $k_n$  – поправка на неоднородность;  $d$  – расстояние между центрами ИИИ и ИК;  $d_{ref}$  – референсное расстояние, равное 1 м.

Рассмотрим влияние каждого из членов, входящих в формулу (1), более подробно.

1. *Калибровочный фактор  $N_K$ .* Для ИИИ на основе  $^{60}\text{Co}$  или  $^{137}\text{Cs}$ , калибровочные факторы  $N_K$  могут быть получены непосредственно через калибровку в пучках того же качества. Однако в настоящее время не существует стандарта калибровки ИК на  $^{192}\text{Ir}$ , и калибровку рекомендуется производить по другим имеющимся методикам. Величина  $N_K$  для  $^{192}\text{Ir}$  определяется либо интерполяцией полученных данных, либо полиномиальной аппроксимацией.

2. *Выбор расстояния “источник–камера”  $d$ .* Увеличение расстояния уменьшает погрешности, связанные с измерением этого расстояния, и влиянием размера ионизационной камеры. Однако это приводит к ослаблению сигнала и увеличению рассеяния излучения от стен и оборудования. Существует четыре основных поправки, зависящих от расстояния  $d$ , которые влияют на точность измерений, а именно:

- ✓ Поправка на размер ИК. Уменьшается с увеличением  $d$ .
- ✓ Поправка на рассеяние фотонов. Увеличивается с увеличением  $d$ .
- ✓ Поправка на неточность позиционирования. Изменяется в соответствии с законом обратных квадратов и, следовательно, уменьшается с увеличением  $d$ .
- ✓ Поправка на ток утечки электрометра. Увеличивается с увеличением  $d$ .

Выбор расстояния, на котором производятся измерения, должен быть осуществлен с целью минимизации вклада всех указанных поправок. В общем случае это расстояние, где сумма квадратов величин, характеризующих поправки, будет иметь наименьшее значение. Например, для ИИИ  $^{192}\text{Ir}$  и ИК фермеровского типа оптимальное расстояние стоит выбирать равным 16 см.

Следует отметить, что все поправки подразумевают формализм точечного источника, следовательно, расстояние  $d$  должно быть достаточно большим для того, чтобы считать ИИИ точечным. Практически это значит, что расстояние  $d$  должно не менее чем в 10 раз превосходить линейный размер ИИИ (в таком случае погрешность, обусловленная размерами ИИИ, не будет превышать 0,1 %).

Рекомендовано производить серию измерений на нескольких расстояниях источник–камера. Расстояния, на которых следует производить измерения, следует выбирать в окрестности оптимального значения (например, между 10 и 40 см).

3. *Поправка на ослабление первичного излучения.* Значения коэффициента для учета ослабления первичных фотонов в воздухе между ИИИ и ИК, представлены в табл. 1.

4. *Поправка на рассеяние излучения.* Для минимизации вклада рассеянного излучения ИИИ и ИК должны располагаться в центре помещения и над полом (на расстоянии не меньше 1 метра от любой из стен и пола). Все измерения должны быть проведены с использованием одной и той же сборки, расположенной в одном и том же месте помещения. В настоящее время используются два метода определения поправки на рассеяние: метод нескольких расстояний и метод теневой защиты (multiple distance method, shadow shield method).

Применение метода нескольких расстояний подразумевает, что рассеяние не зависит от расстояния, на котором производятся изме-

**Таблица 1**  
**Поправочные коэффициенты для**  
**учета ослабления первичных**  
**фотонов в воздухе**

Расстояние между ИИИ и ИК, см	<sup>192</sup> Ir	<sup>137</sup> Cs	<sup>60</sup> Co
10	1,001	1,000	1,000
20	1,002	1,000	1,000
30	1,004	1,001	1,000
40	1,005	1,001	1,000
50	1,006	1,001	1,000
60	1,007	1,001	1,000
70	1,009	1,002	1,000
80	1,010	1,002	1,000
90	1,011	1,002	1,000
100	1,012	1,002	1,000

рения. Различия в показаниях прибора после произведенных поправок на температуру, давление, неоднородность и т.д. должны обуславливаться лишь законом обратных квадратов. При выборе расстояний в диапазоне 10–50 см величина поправки на рассеяние, как правило, меняется незначительно.

Преимуществом метода является простота использования и хорошая согласованность полученных результатов с измеренными поправками на рассеяние. При использовании метода следует обращать особое внимание на аккуратное и точное определение расстояния источник–камера:

$$d' = d + c, \tag{2}$$

где  $d'$  – уточненное расстояние от центра ИИИ до центра камеры;  $d$  – непосредственно измеренное расстояние от центра ИИИ до центра ИК;  $c$  – смещение (положительное или отрицательное).

Влияние величины мощности воздушной кермы  $\dot{K}_s$ , обусловленное рассеянием, включено в измеренное значение  $\dot{K}(d)$ . Следовательно, мощность воздушной кермы, обусловленная вкладом лишь первичных фотонов, определяется следующим образом:

$$\dot{K}_p(d') = \dot{K}(d) - \dot{K}_s. \tag{3}$$

Преобразуя формулы (2) и (3), получаем:

$$\dot{K}_p(d') = \frac{(\dot{K}(d') - \dot{K}_s) \cdot (d + c)^2}{d'^2}. \tag{4}$$

Величина мощности воздушной кермы, обусловленная вкладом первичных фотонов,

изменяется в соответствии с законом обратных квадратов, следовательно, для определения неизвестных величин  $\dot{K}(d')$ ,  $\dot{K}_s$  и  $c$  достаточно измерений на трех различных расстояниях. Для минимизации погрешности рекомендовано проведение измерений на 5–7 различных расстояниях, например, 10, 15, 20, 25, 30, 35 и 40 см. Величина поправки на рассеяние, таким образом, равна:

$$k_{scatt} = 1 - \frac{\dot{K}_s}{\dot{K}(d')} = 1 - \frac{\dot{K}_s}{N_k \cdot M_U \cdot k_n}. \tag{5}$$

Значения измеренных величин заряда  $M_U$  должны быть скорректированы на условия измерений. Рассчитанные значения величины сдвига  $c$  не должны превышать 1 мм. Если измеренные значения величины сдвига превышают допустимые, весь процесс измерений должен быть тщательно пересмотрен и воспроизведен заново.

Суть метода теневой защиты заключается в том, что конус из материала с высоким значением  $Z$  размещается между ИИИ и ИК для того, чтобы избежать попадания первичных фотонов в объем ИК (рис. 1). Конус должен быть достаточной высоты для того, чтобы обеспечить необходимое ослабление первичного излучения. Он не должен быть расположен слишком близко к камере во избежание вклада обратного рассеяния.

Из отношения величин измеренного заряда с теневой защитой и без нее можно определить значение поправки на рассеяние.

Преимущество метода – вклад рассеяния измеряется непосредственно, а не косвенно. Однако существенным недостатком является то, что для расстояний, на которых проводятся измерения (10–50 см), сложно выполнить необходимые измерения, особенно для <sup>60</sup>Co. Размеры конуса для таких источников настолько



**Рис. 1.** Схема определения поправки на рассеяние методом теневой защиты

Таблица 2

**Значения поправок на рассеяние для ИИИ  $^{192}\text{Ir}$  в зависимости от типа ИК  
и размеров помещения**

Автор	$k_{scatt}$	ИК	Размеры помещения, м
Verhaegen et al 1992	0,940	NE 2551 and Exradin A6	4×4×4
Verhaegen et al 1992	0,975	PTW LS-10	4×4×4
Petersen et al 1994	0,940	Exradin A5	6×6×3
Drugge 1995	0,940	Exradin A5 and NE 2530/1	3,5×5×3,5
Piermattei et al 1997	0,928	Exradin A4	–
Piermattei et al 1997	0,941	Exradin A6	–

велики, что на практике производить такие измерения крайне затруднительно.

В табл. 2 приведены экспериментально измеренные поправки на рассеяние для источника  $^{192}\text{Ir}$  на расстоянии 1 м. Показано, что величина вклада рассеяния слабо зависит от параметров помещения.

5. *Поправка на неоднородность.* ИИИ является изотропно излучающим, следовательно, условия калибровки ИК отличаются от геометрии коллимированных пучков фотонов, в которых откалибрована ИК. Таким образом, флюенс фотонов в различных частях ИК будет неоднороден. Вторичные электроны в объеме ИК в основном образуются из-за взаимодействия фотонов с материалом стенок ИК. Из-за неоднородности фотонного излучения флюенс вторичных электронов будет также неоднороден в различных частях воздушной полости ИК.

Поправка на неоднородность флюенса вторичных электронов внутри полости ИК зависит от:

1. Размеры и геометрических параметров ИК (сфера, цилиндр и т.д.).
2. Расстояния источник–камера и геометрии ИИИ (точечный, линейный и т.д.).
3. Материала внутренней стенки ИК.
4. Энергетического спектра фотонов источника.

В табл. 3 приведены значения поправок на неоднородность для некоторых ИК фермеровского типа и источника  $^{192}\text{Ir}$ .

6. *Поправка на температуру, давление, полярность, рекомбинацию, утечку и время доставки ИИИ из положения “хранение”.* Поправка на температуру и давление производится путем умножения полученных данных на коэффициент  $k_{TP}$ , который определяется так же, как и при дозиметрии внешних пучков фотонов или электронов:

$$k_{TP} = \frac{T}{T_0} \cdot \frac{P_0}{P}, \quad (6)$$

где  $T$  и  $T_0$  – температура в момент проведения измерений и 293,15 К, соответственно,  $P$  и  $P_0$  – давление в момент проведения измерений и 101,3 кПа соответственно.

Поправка на полярность  $k_p$ , как правило, изменяет измеряемую величину не более чем на 1 % и определяется следующим образом:

$$k_p = \frac{|M_1| + |M_2|}{2|M_1|}, \quad (7)$$

где  $M_1$  и  $M_2$  – измеренный сигнал при прямой и инверсной полярностях напряжения.

Поправка на эффективность собирания ионов (учитывающая эффекты рекомбинации)  $k_{ion}$  равна:

$$k_{ion} = \frac{3}{4 - M / M_2}, \quad (8)$$

где  $M$  и  $M_2$  – измеренный сигнал при номинальном и половинном напряжении, соответственно.

Поправка на перемещение источника вводится для того, чтобы учесть измеренный сигнал в то время, когда ИИИ перемещается из положения “хранение” в заданную позицию и обратно. Величина сигнала сильно зависит от расстояния источник–камера. Для устранения этого фактора, влияющего на результат измерений, рекомендовано применение нескольких способов:

1. Использование электрометров с внешним управлением, позволяющих собирать заряд в течение того интервала времени, когда ИИИ находится в позиции.
2. Сравнение двух величин заряда для двух различных интервалов измерений с последующим исключением поправки путем вычитания меньшего значения из большего.

Таблица 3

Значения поправок на неоднородность для ИИИ  $^{192}\text{Ir}$ 

Тип ИК	Расстояние, см						
	10	15	20	25	30	40	50
	$k_d$						
Capintec 0,65 cm <sup>3</sup> PR-06C Farmer	1,011	1,007	1,004	1,003	1,002	1,001	1,001
Capintec 0,65 cm <sup>3</sup> PR-05P Farmer	1,012	1,007	1,005	1,003	1,002	1,002	1,001
Exradin 0,5 cm <sup>3</sup> A2	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,000	1,000
Exradin 0,5 cm <sup>3</sup> P2	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,000	1,000
Exradin 0,5 cm <sup>3</sup> T2	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,000	1,000
Exradin 0,65 cm <sup>3</sup> Farmer A 12	1,012	1,007	1,005	1,003	1,002	1,001	1,001
NE 0,6 cm <sup>3</sup> Farmer, models 2502, 2505/A, 2505/3A, 2505/3B	1,011	1,007	1,005	1,003	1,002	1,001	1,001
NE 0,6 cm <sup>3</sup> Farmer 2571	1,009	1,005	1,004	1,003	1,002	1,002	1,001
NE 0,6 cm <sup>3</sup> Farmer 2581	1,009	1,005	1,004	1,003	1,002	1,002	1,001
PTW 1,0 cm <sup>3</sup> 23 331 rigid	1,011	1,007	1,005	1,005	1,002	1,002	1,001
PTW 0,6 cm <sup>3</sup> Farmer 30 001	1,011	1,007	1,005	1,005	1,002	1,002	1,001
PTW 0,6 cm <sup>3</sup> Farmer 30 002	1,011	1,007	1,004	1,005	1,002	1,002	1,001

3. Измерение тока после того, как ИИИ встал в позицию (если сигнал достаточно велик).

При использовании наперстковых ИК или ИК типа фермеровского следует делать поправку на ток утечки в связи с тем, что измеряемый сигнал в 50–100 раз меньше, чем при ГК ДЛТ. Сферические ИК большого объема менее подвержены данному эффекту. Это явление надо учитывать, если величина тока утечки превышает 0,1 % от величины измеряемого сигнала.

### Измерения с использованием ИК колодезного типа

Метод рекомендуется для использования в клинических условиях. Если ИК наполнена сжатым газом под давлением, превышающим атмосферное, калибровочный фактор ИК со временем может изменяться вследствие утечки. ИК должна быть предназначена для калибровки источников, используемых в брахитерапии (рис. 2).

Применение ИК колодезного типа, используемых в ядерной медицине, не рекомендовано по следующим причинам:

- ✓ ИК откалиброваны в единицах активности.
- ✓ ИК предназначены для измерения активности открытых, а не инкапсулированных ИИИ.
- ✓ ИК могут быть загрязнены открытыми радионуклидами.



Рис. 2. ИК колодезного типа

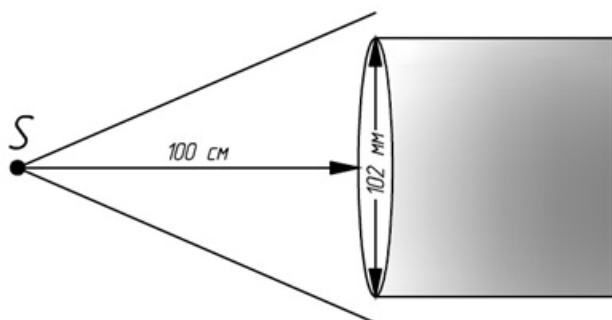


Рис. 3. Проверка стабильности сигнала ИК колодезного типа в пучке излучения  $^{60}\text{Co}$

- ✓ Показания могут меняться со временем из-за утечки сжатого газа.
- ✓ Толстые стенки колодезной части камеры могут поглощать часть излучения.

В связи с тем, что калибровочный фактор ИК может изменяться со временем, рекомендовано периодически самостоятельно проверять ИК с помощью долгоживущего источника  $^{137}\text{Cs}$ . В качестве альтернативы можно проверять стабильность показаний ИК с помощью внешнего облучения  $^{60}\text{Co}$  в воспроизводимой геометрии (рис. 3).

Для того, чтобы убедиться в стабильности показаний ИК, следует производить поправки на распад ИИИ, давление и температуру (в тех случаях, когда это необходимо). Отклонение показаний ИК относительно исходных более чем на 0,5 % может свидетельствовать о наличии проблемы. В случае, если отклонение измеренного сигнала не превышает 2 % относительно исходного значения, ИК можно использовать в клинике, но следует попытаться найти возможную причину расхождения.

Проведение измерений мощности воздушной кермы выполняется в соответствии с инструкцией, прилагаемой к ИК. Измерения должны проводиться в геометрии минимального рассеяния. ИК должна находиться на расстоянии не менее 1 м от любой из стен и пола. Перед началом измерений ИК должна находиться в помещении, где проводятся измерения, не менее 30 мин, чтобы быть в равновесии с окружающей средой.

ИИИ во время проведения измерений должен находиться в “эффективной точке” или “точке калибровки” – положении, в котором сигнал, измеренный электроретром, будет наибольшим. Позиция эффективной точки зави-

сит от типа ИИИ и должна быть указана в сертификате, прилагаемом к ИК. Рекомендуется также самостоятельно проверять чувствительность показаний ИК путем небольшого смещения позиции ИИИ относительно эффективной точки. Если вариации измеренного сигнала отличаются не более чем на 1 %/см, то это свидетельствует о воспроизводимости показаний.

В общем случае, величина мощности воздушной кермы определяется как:

$$\dot{K}_R = N_K \cdot \left( \frac{M}{t} \right), \quad (9)$$

где  $N_K$  – калибровочный фактор ИК;  $M$  – измеренный заряд за время  $t$  с поправкой на температуру, давление, и рекомбинацию, которая осуществляется в соответствии с формализмом, изложенным выше.

Следует понимать, что если камера хранилась в помещении с температурой, на несколько градусов превышающей температуру в помещении, где проводятся измерения, то после того, как камера будет перенесена в бункер, может пройти несколько часов перед тем, как температура в камере сравняется с температурой в бункере. Этот эффект был показан на камере HDR 1000 Plus, и ожидается, что камеры других типов будут вести себя схожим образом.

Измеренные значения заряда или тока должны быть получены с точностью не менее чем до четвертой значащей цифры. Должно быть проведено не менее 5 измерений для каждой подачи источника. Показания не должны монотонно возрастать или монотонно убывать, обеспечивая прохождение “эффективной точки”. Следует произвести не менее двух подач ИИИ.

Для ИИИ, работающих в диапазоне HDR, результаты измерений не должны отклоняться от среднего более чем на 0,3 %, а средние значения двух серий измерений не должны различаться более чем на 0,5 %.

### Калибровка с использованием фантома

Твердотельный фантом (рис. 4) можно использовать для двух смежных задач.

Во-первых, фантом можно применять как дополнительный инструмент гарантии качества, если ИИИ откалиброваны одним из предложенных выше способов. В этом случае отно-



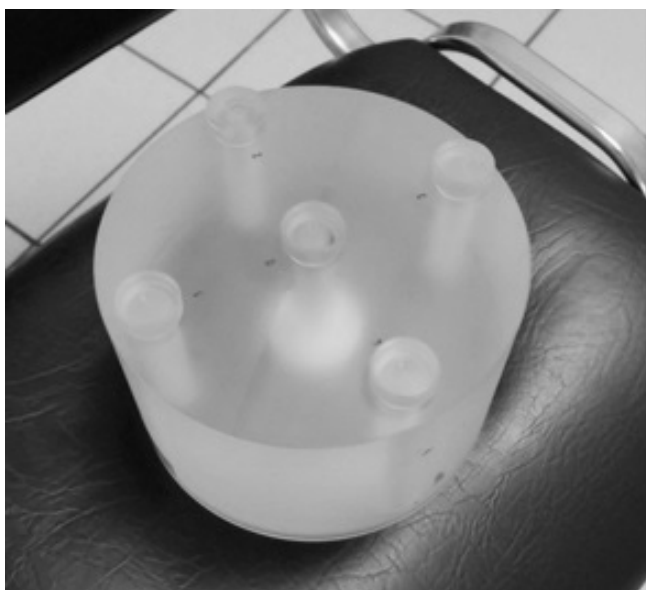


Рис. 4. Твердотельный фантом PTW

шение  $q = M_c / M_p$ , где  $M_p$  и  $M_c$  – измеренные значения сигнала в фантоме и другим методом соответственно, должно быть постоянным для всех типов ИИИ. Если измеренные значения  $q$  значительно различаются между собой, то это свидетельствует о том, что процедура калибровки проведена неправильно.

Коммерческие твердотельные фантомы также используются для проведения непосредственных измерений величины мощности воздушной кермы. Обычно такие фантомы имеют соответствующие вставки для источника и ИК. Кроме того, к фантому прилагаются соответствующие инструкции по проведению измерений.

Значение величины мощности кермы в воздухе  $\dot{K}_R$  определяется следующим образом [4]:

$$\dot{K}_R = N_K \cdot \left( \frac{M_U}{t} \right) \cdot p_r \cdot f_{wp} \cdot f_{sc} \cdot f_{geo} \cdot p_w \cdot \left( \frac{d}{d_{ref}} \right)^2, \quad (10)$$

где  $N_K$  – калибровочный фактор ИК;  $M_U$  – собранный за время  $t$  заряд с поправкой на температуру, давление, полярность, рекомбинацию и время доставки ИИИ из положения “хранение”;  $p_r$  – поправка, учитывающая замещение материала фантома полостью ИК;  $f_{wp}$  – поправка, учитывающая различие в электронной плотности материала фантома и воды;  $f_{sc}$  – поправка, учитывающая разницу в величине рассеянного из-

Таблица 4  
Значения поправочных коэффициентов при калибровке ИИИ в тканезквивалентном фантоме

Источник	Значения поправочных коэффициентов				
	$p_r$	$f_{wp}$	$f_{sc}$	$f_{geo}$	$p_w$
$^{60}\text{Co}$	0,996	1,004	1,008	1,173	1,005
$^{192}\text{Ir}$	1,007	1,004	1,107	1,034	1,008

лучения для полнорассеивающего фантома и фантома, в котором производятся измерения;  $f_{geo}$  – поправка, учитывающая поглощение и рассеяние в воде;  $p_w$  – поправка на поглощение и рассеяние в стенке ИК и колпачке во время калибровки;  $d$  – расстояние между центрами ИИИ и ИК;  $d_{ref}$  – референсное расстояние, равное 1 м.

Поправочные коэффициенты  $p_r, f_{wp}, f_{sc}, f_{geo}, p_w$  для ИК PTW 30001 с колпачком 4,45 мм PMMA для источников  $^{60}\text{Co}$  и  $^{192}\text{Ir}$  приведены в табл. 4.

### Относительные измерения

К сожалению, для многих медицинских учреждений измерение мощности воздушной кермы для брахитерапии до сих пор остается невыполнимым. В основном это связано со сложностью получения калибровочного коэффициента  $N_K$  из поверочной лаборатории. В таком случае рекомендовано иметь по крайней мере для ИИИ, замена которых происходит регулярно (например,  $^{192}\text{Ir}$ ), методику относительных измерений для сравнения измеренной величины со значением, указанным в сертификате на ИИИ. Для этой цели подходит метод с высокой степенью надежности и воспроизводимости, например, измерения с помощью твердотельного фантома или ИК колодезного типа. Метод должен минимизировать погрешность, связанную с изменением расстояния источник–камера или с позиционированием ИИИ. Стабильность результатов измерений во времени можно проверять с помощью долгоживущего ИИИ (например,  $^{137}\text{Cs}$ ). Измеренные значения можно сравнивать с активностью или мощностью воздушной кермы, указанной в сертификате, с учетом поправки на распад.

С помощью этого метода можно проводить сравнение последовательно поставляе-

Таблица 5

## Сводная информация о методах дозиметрии

Метод	Параметр		
	Сложность	Длительность	Типы ИИИ
Измерение в воздухе	+++++	+++++	Любые
Измерение с помощью ИК колодезного типа	+	+	Любые
Измерения в твердотельном фантоме	++	++	Зависит от типа фантома

мых в клинику сменных ИИИ. В том случае, если расхождение со средним уровнем достигнет величины, например, 3–5 % (в зависимости от надежности метода), причина расхождения должна быть тщательно проанализирована. Необходимо производить измерения до начала лечения пациентов во избежание негативных последствий, связанных с ошибками.

### Заключение

Следует понимать, что в технологическом процессе, включающем в себя производство ИИИ, калибровку ИИИ производителем, сертификацию и его доставку пользователю, может возникнуть множество ошибок, большей частью связанных с человеческим фактором. В связи с этим рекомендуется проверять основной параметр, характеризующий поставляемый в клинику сменный ИИИ путем проведения независимых измерений мощности воздушной кермы.

В табл. 5 приведена сводная информация о трех методах дозиметрии ИИИ HDR.

Мы надеемся, что представленный материал окажется полезным и позволит улучшить качество процедуры HDR-брахитерапии, что, в свою очередь, приведет к улучшению клинических результатов.

### Список литературы

1. Venselaar J., Perez-Calatayud J. A practical guide to quality control of brachytherapy equipment. ISBN 90-804532-8. ESTRO booklet No. 8, 2004, ESTRO.
2. Baltas D., Sakelliou L., Zamboglou N. The Physics of modern brachytherapy for oncology. – New York: Taylor & Francis Group LLC, 2007, 670 pp.
3. Calibration of photon and beta ray sources used in brachytherapy. IAEA-TECDOC-1274. IAEA, Vienna, 2002, 58 pp.
4. Тарутин И.Г., Пышняк В.Л.. Измерение мощности воздушной кермы и вычисление дозы и мощности дозы от радиоактивных источников, применяемых в аппаратах контактной лучевой терапии. Методические рекомендации. – Минск. 1999. 36 с.

### CALIBRATION OF PHOTON SOURCES FOR HDR BRACHYTHERAPY IN ACCORDANCE WITH INTERNATIONAL RECOMMENDATIONS

M. Kuznetsov<sup>1</sup>, O. Kozlov<sup>2</sup>, A. Fedyanina<sup>2</sup>

<sup>1</sup> LLC Medscan, Moscow, Russia

<sup>2</sup> N.N. Blokhin Russian Cancer Research Center, Moscow, Russia

Dosimetry methods of the ionizing radiation sources for afterloading HDR brachytherapy to define a value of reference air kerma rate during acceptance testing in accordance with international recommendations are presented.

Key words: brachytherapy, quality assurance, radiation source, dosimetry, international recommendations

E-mail: [catcher-intherye@yandex.ru](mailto:catcher-intherye@yandex.ru)