

ДОЗОВАЯ НАГРУЗКА МЕДИЦИНСКОГО ФИЗИКА ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПЭТ/КТ

М. С. Конопацкая¹⁾, А. В. Пинчук¹⁾, О. М. Хаджинова¹⁾

¹⁾ Учреждение образования «Международный государственный экологический институт имени А. Д. Сахарова» Белорусского государственного университета, ул. Долгобродская, 23/1, 220070, г. Минск, Беларусь, avpmephi@gmail.com

В статье проведен анализ программы контроля качества ПЭТ/КТ. Выявлены основные источники формирования дозы внешнего облучения медицинского физика. Проведен контроль мощности дозы внешнего облучения при различных процедурах контроля качества с помощью прибора для контроля радиационной обстановки. Произведена теоретическая оценка эффективной дозы внешнего облучения медицинского физика. Оценена годовая эффективная доза облучения персонала, проводящего контроль качества ПЭТ/КТ с помощью фантомов, представляющих собой объемные источники ионизирующего излучения. Оценка средней дозы облучения за год не превышает основного дозового предела. Даны предложения дальнейшей оптимизации радиационной защиты персонала.

Ключевые слова: медицинский физик; контроль качества ПЭТ/КТ; источник ионизирующего излучения; фантом; дозовая нагрузка; мощность амбиентного эквивалента дозы; эффективная доза.

THE RADIATION DOSE OF A MEDICAL PHYSICIST IN CASE OF PERFORMING PET/CT QUALITY CONTROL

M. S. Konopatskaya¹⁾, A. V. Pinchuk¹⁾, O. M. Khajinova¹⁾

¹⁾ International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University, Dolgobrodskaya str., 23/1, 220070, Minsk, Belarus, avpmephi@gmail.com

The article analyzes the PET/CT quality control program. The main sources of the formation of the dose of external radiation of a medical physicist have been identified. The external radiation dose rate was monitored during various quality control procedures using a radiation monitoring device. A theoretical assessment of the effective dose of external radiation of a medical physicist has been made. The annual effective radiation dose of personnel conducting PET/CT quality control using phantoms representing volumetric sources of ionizing radiation is estimated. The estimate of the average annual radiation dose does not exceed the basic dose limit. Suggestions for further optimization of radiation protection of personnel are given.

Keywords: medical physicist; PET/CT quality control; ionizing radiation source; phantom; radiation dose; ambient dose equivalent capacity; effective dose.

<https://doi.org/10.46646/SAKH-2025-1-58-62>

Современная медицинская диагностика активно использует методы визуализации, среди которых позитронно-эмиссионная томография (ПЭТ) в сочетании с компьютерной томографией (КТ) играет важную роль. Комбинация ПЭТ и КТ связывает в единое целое преимущества обеих диагностических систем. КТ отображает своего рода трёхмерную анатомическую карту человеческого тела, на которой сверху наложено изображение ПЭТ, которое точно выявляет области ткани с повышенной биологической активностью. В настоящее время метод ПЭТ/КТ является самым высокоинформативным в онкологии [1].

Методы контроля качества (КК) ПЭТ/КТ включают в себя регулярные проверки оборудования, калибровку детекторов, а также оценку качества получаемых изображений. КК ПЭТ/КТ является комплексом измерений, оценивающих соответствие параметров оборудования действующим нормативам и техническим условиям. Результаты этого контроля служат основой для принятия решений о сервисном обслуживании, ремонте и калибровке аппарата [2].

Данные процедуры в медицинском учреждении проводит медицинский физик, который подвергается профессиональному облучению. Оценка дозовой нагрузки, получаемой медицинским физиком при выполнении КК, позволяет контролировать непревышение дозовых пределов облучения персонала и оценить достигнутый уровень обеспечения радиационной безопасности. В ходе выполнения данной работы проведена оценка дозы внешнего облучения медицинского физика при выполнении контроля качества ПЭТ/КТ на базе Республиканского центра позитронно-эмиссионной томографии ГУ РНПЦ ОМР им.Н.Н.Александрова.

Существует следующая программа контроля качества, адаптированная с учетом имеющегося оборудования в типовых отделениях ядерной медицины в Республике Беларусь:

I. Ежедневный контроль качества ПЭТ/КТ (выполняется с колодезным фантомом ^{68}Ge).

II. Еженедельный контроль качества ПЭТ/КТ (включает в себя обновление коэффициента усиления и последующий контроль качества с анализом схемы детекторов и синограмм, а также проверку числа воды и контрастной разрешающей способности).

III. Ежемесячный контроль качества ПЭТ/КТ (обеспечивает коррекцию колодезного счетчика, которая выполняется с цилиндрическим водонаполненным фантомом с использованием радиофармпрепаратов (РФП), также производится контроль качества совмещения изображения, где применяется стандартный фантом VQC (phantom for Volumetric Quality Control), наполненный ^{68}Ge)).

IV. Верификационные тесты (выполняются со стандартизированным фантомом ИЕС (International Electrotechnical Commission) или адаптированным Jaszczak, наполненными РФП ^{18}F).

V. Контроль качества периферического оборудования (включает в себя ежедневную проверку встроенного калибратора активности).

VI. Контроль протоколов и программного обеспечения [3].

Таким образом, основное облучение медицинского физика при выполнении контроля качества ПЭТ/КТ формируется при проведении ежедневного и ежемесячного контроля качества, а также при проведении верификационных тестов, так как в этих случаях необходимо использование ИИИ.

Для количественной оценки уровня радиационной безопасности Международная комиссия по радиологической защите (МКРЗ) предлагает использовать эффективную дозу. Эта величина служит основой для установления пределов доз облучения и применяется для анализа воздействия ионизирующего излучения на человека. Ее использование позволяет оценить соответствие условий эксплуатации источников излучения действующим нормам радиационной безопасности. Для измерения индивидуальной дозы внешнего облучения применяется операционная величина, известная как эквивалент дозы [4].

Контроль дозы внешнего облучения персонала осуществляется путем мониторинга радиационной обстановки с использованием специализированного дозиметрического оборудования. Такие приборы измеряют амбиентный эквивалент дозы, который характеризует поле излучения в точке, соответствующей центру шарового фантома МКРЕ. Фантом представляет собой сферу диаметром 30 см, изготовленную из тканеэквивалентного материала с плотностью 1 г/см³ [4]. Кроме того, эффективную дозу можно рассчитать теоретически, если известны такие параметры, как энергетический спектр ионизирующего излучения, активность источника и геометрия облучения [5].

ИИИ, которые используются в КК ПЭТ/КТ, представляют собой фантомы, содержащие радионуклиды ^{68}Ge и ^{18}F . Для различных процедур контроля качества ПЭТ/КТ используются разные фантомы, отличающиеся по геометрии, размерам и распределению РФП внутри них. Эти различия обусловлены разными целями тестов и необходимостью оценки конкретных параметров системы ПЭТ/КТ. Следует отметить, что германиевые фантомы в КК используются многократно, в то время как фантомы с ^{18}F необходимо наполнять перед каждой процедурой

КК, что объясняется периодом полураспада изотопов: у ^{68}Ge – 270,93 дней, у ^{18}F – 109,77 минут. РФП, который в дальнейшем будет внедрен в фантом, хранится в свинцовой защите. Также для контроля КК используется закрытый источник ^{137}Cs . Хранение и транспортировка ^{137}Cs , как в случае с ^{18}F , осуществляются в свинцовой защите, из которой он изымается для помещения его в калибратор активности во время КК периферического оборудования.

Данные изотопы представляют внешнюю радиационную опасность в основном в силу испускания сильнопроникающего излучения: ^{137}Cs испускает гамма-кванты с энергией 661,6 кэВ, а ^{68}Ge и ^{18}F – позитроны, которые аннигилируют с электронами, образуя два гамма-кванта с энергией 511 кэВ.

Для контроля радиационной обстановки при проведении процедур контроля качества КК ПЭТ/КТ использован дозиметр рентгеновского и гамма-излучения ДКС-АТ1121. Регистрация мощности эквивалента амбиентной дозы проводилась на разных расстояниях от используемых ИИИ для того, чтобы учитывать взаимное расположение ИИИ во время транспортировки и позиционирования относительно медицинского физика при последующей оценке дозы внешнего облучения при проведении данных процедур. Фоновое значение мощности эквивалента амбиентной дозы составило 0,1 мкЗв/ч. Измерения проводились трехкратно на высоте 1 м над уровнем пола до достижения статистической погрешности менее 20%. Полученные результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1

Средние значения мощности амбиентной дозы от ИИИ, применяемых в КК ПЭТ/КТ, с вычетом фоновых значений, мкЗв/ч

ИИИ	Расстояние от ИИИ до точки измерения		
	у поверхности	0,3 м	1 м
Колодцевый фантом ^{68}Ge	261,5	17,1	4,7
^{137}Cs в свинцовой защите	–	3,11	–
^{137}Cs без свинцовой защиты	70,1	2,76	0,7
^{18}F в свинцовой защите	158,3	29,56	9,7
^{18}F без свинцовой защиты	135999,9	4366,56	–
VQC фантом с ^{68}Ge	8,4	1,89	0,5

Доза внешнего облучения медицинского физика при выполнении контроля качества ПЭТ/КТ была оценена с учетом времени работы с ИИИ и расстояния между ИИИ и работником по следующей формуле:

$$E = \Sigma H(d) \cdot t,$$

где – среднее значение мощности эквивалента амбиентной дозы на некотором расстоянии (мкЗв/ч); t – время, в течение которого медицинский физик работает с ИИИ на данном расстоянии (ч).

Также проведена теоретическая оценка эффективной дозы внешнего облучения персонала при проведении КК ПЭТ/КТ с помощью цилиндрического водонаполненного фантома и фантома ИЕС, наполняемых РФП ^{18}F , следующим образом:

$$E = \Phi \cdot \delta_e,$$

где Φ – флюенс частиц (1/см²); δ_e – эффективная доза на единичный флюенс (Зв/см²).

Оценка флюенса проводилась на основании известных данных об активности РФП и геометрических параметров фантома без учета поглощения в среде испускаемого фотонного излучения. При оценке времени облучения медицинского физика оценивалась длительность манипуляций с ИИИ, а также примерное количество проведения процедур КК в год в данной организации.

Результаты оценки эффективной дозы приведены в таблице 2.

Таблица 2

Эффективная доза от процедур КК ПЭТ/КТ с использованием ИИИ

ИИИ	Процедура	Частота проведения	Эффективная доза, мЗв
Колодцевый фантом ^{68}Ge	КК	Ежедневно	0,37
Флакон ^{137}Cs	КК	Ежедневно	0,29
Фантом VQC	КК	Ежемесячно	0,001
Цилиндрический водонаполненный фантом	Наполнение фантома РФП, КК	Ежемесячно	0,7
Фантом ИЕС	Наполнение фантома, верификационные тесты	Ежегодно	0,52

Из полученных данных видно, что наибольшую дозовую нагрузку медицинский физик получает при выполнении ежемесячного теста с использованием цилиндрического водонаполненного фантома. Это объясняется тем, что при данной процедуре необходимо работать с РФП большой активности (10^9 Бк) для наполнения фантома. Наименьшую дозовую нагрузку специалист получает при проведении ежемесячного контроля качества с использованием германиевого фантома VQC, в данном случае фантом имеет относительно небольшую активность (3,5 МБк на дату выпуска). Таким образом, можно сделать вывод, что дозовая нагрузка медицинского физика при проведении КК ПЭТ/КТ зависит от активности и типа ИИИ, энергии излучения, времени работы с ИИИ, частоты проведения тестов, а также расстояния, на котором находится персонал при выполнении тестов.

Для оценки дозы облучения персонала при аварийной ситуации при работе на ПЭТ/КТ была смоделирована ситуация падения флакона с РФП без повреждения целостности. Доза облучения при ликвидации данной внештатной ситуации оценена в 0,1 мЗв, это значение учтено в оценке эффективной дозы от ежемесячной процедуры КК с использованием цилиндрического водонаполненного фантома.

Суммарная доза внешнего облучения медицинского физика, которая формируется при проведении КК ПЭТ/КТ, составила 1,881 мЗв. Следует также учитывать, что данное значение было получено с учетом, что все процедуры КК были выполнены одним специалистом, в реальности же контроль качества ПЭТ/КТ в течение года проводят несколько медицинских физиков, и данное условие уменьшает дозовую нагрузку на каждого работника.

Согласно постановлению Совета Министров Республики Беларусь №829, для оптимизации обеспечения радиационной защиты устанавливается предел дозы облучения 20 мЗв/год – для ограничения облучения персонала радиационного объекта или объекта использования атомной энергии [6]. Таким образом, полученные оценки эффективной дозы внешнего облучения персонала за счет гамма-излучения ИИИ, используемых при проведении КК ПЭТ/КТ, значительно ниже предела средней годовой эффективной дозы при профессиональном облучении, что свидетельствует о том, что достигнутый уровень радиационной безопасности соответствует установленным нормативам.

Несмотря на то, что полученное значение является приемлемым, всегда существует возможность снижения доз облучения персонала при работе с ИИИ. В целях оптимизации радиа-

ционной защиты можно принять следующие меры: анализ процедур контроля качества с целью идентификации этапов, вносящих наибольший вклад в дозовую нагрузку, и их дальнейшая оптимизация (сокращение времени проведения тестов, использование более эффективных методик измерений), там, где это возможно, использование устройств дистанционного управления для работы с ИИИ, минимизируя время непосредственного контакта с ними.

Библиографические ссылки

1. Бекман И. Н. Ядерная медицина: физические и химические основы : учебник для бакалавриата и магистратуры . Изд.2-е., испр. и доп. Москва : Юрайт, 2016. 401 с.
2. Емельяненко Е. В., Тарутин И.Г. Анализ системы контроля качества позитронно-эмиссионной томографии в Республике Беларусь. Журнал Белорусского государственного университета. Экология. 2020. №2. С. 59–66.
3. Тарутин И. Г., Хоружик С. А., Чиж Г. В. Протокол контроля качества работы рентгеновских компьютерных томографов (инструкция по применению). Утверждена МЗ РБ 26.06.2006 г., регистрационный № 192-1205. Минск : НИИ онкологии и медицинской радиологии им. Н. Н. Александрова; 2006.
4. Кутьков В. А. Величины в радиационной защите и безопасности // АНРИ. 2007. № 3(20). С. 2–25.
5. Романцова И. В., Ткаченко В. В., Кутьков В. А. Сборник задач по дозиметрии и защите от ионизирующих излучений. М. : НИЯУ МИФИ, 2023.
6. Об изменении постановления Совета Министров Республики Беларусь от 25 января 2021 г. № 37 [Электронный ресурс] : постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 29 ноя. 2022 г., № 829 // ЭТАЛОН. Законодательство Республики Беларусь / Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. Минск, 2024.