

## Методика контроля радиологической защиты при эксплуатации модификаций ускорителей электронов с учетом поведений активности

### Аннотация

В статье обсуждаются актуальные и важные вопросы радиационного контроля медицинских систем для лучевой терапии с линейными ускорителями, которые недостаточно полно освещены в действующих нормативных документах. Приводится методология расчета допустимых величин мощности дозы (ДМД) на рабочих местах и в смежных помещениях для различных категорий и групп облучаемых лиц, в которой учитываются рабочая нагрузка и особенности режима работы кабинета для лучевой терапии. Представлены значения допустимых мощностей доз (ДМД) для помещений различного назначения, смежных с процедурной медицинского ускорителя, в том числе и ДМД для населения. Показано, что значения допустимых мощностей доз при радиационном контроле ускорителей могут на порядок превышать проектные значения ДМД из СанПиН-2.6.1.2573-10 [1].

### Введение

Ежегодно во всем мире онкологические заболевания выявляются у 10 млн. человек, в том числе в России – у 500 тыс. человек. Смертность от онкологических заболеваний стоит на втором месте в развитых странах и на третьем месте в нашей стране, и с каждым годом число пациентов с диагнозом «злокачественная опухоль» растет. Ведущие фармакологические компании во всем мире тратят огромные средства на исследования и поиск эффективных препаратов от раковых заболеваний, но пока эти усилия не приносят удовлетворительных результатов. До настоящего времени одним из эффективных методов лечения онкологических заболеваний остается лучевая терапия, поэтому потребность в радиотерапевтических системах с линейными медицинскими ускорителями электронов очень велика. Этот метод лечения применяется как самостоятельно, так и в сочетании с хирургическим лечением или с химиотерапией, дополняя их и повышая лечебный эффект.

Действующие в настоящее время санитарные правила по линейным ускорителям [1] не освещают всех проблемных вопросов, с которыми приходится сталкиваться как на стадии проектирования, так и при проведении радиационного контроля.

Приведенная в [1] методика расчета радиационной защиты не учитывает ряда важных условий формирования излучения: наличия рассеяния от различных мишеней (пациент, элементы конструкции ускорителя и вспомогательное оборудование); образования фотонейтронов на элементах головки ускорителя и ограждающих конструкций при энергиях более 10 МэВ и др. Все эти эффекты могут существенно влиять на количественный и качественный состав защиты. Кроме того, в нормативных документах и в рекомендованной литературе отсутствуют справочные данные по толщине защиты для больших энергий излучения [2]. Существующая методика тоже вызывает много вопросов и содержит ряд недостатков, которые могут повлиять на радиационную безопасность персонала и населения [3]. Очень часто при проектировании забывают о разработке инструкции радиационного контроля, в которой должны быть указаны точки контроля и допустимые значения мощности дозы либо дозы в указанных точках с учетом назначения и занятости смежного помещения, а также коэффициента использования ускорителя. Вышеперечисленные факты затрудняют расчет, правильное определение толщины эффективной защиты от всех видов ионизирующего излучения и не всегда позволяют дать правильную оценку радиаци-

онной безопасности для отделений лучевой терапии с линейным ускорителем.

Важной проблемой радиационного контроля отделений лучевой терапии, оснащенных линейными ускорителями, является метрологическое и приборное обеспечение измерений. Все используемые в медицинских целях линейные ускорители являются источниками импульсного ионизирующего излучения. Дозиметрия импульсных полей излучения имеет ряд важных особенностей, зависящих от длительности импульсов, частоты следования, их скважности и дозы в импульсе. В настоящее время отсутствуют нормативные и методические документы, регламентирующие проведение дозиметрических измерений от источников импульсного излучения. Остро стоит вопрос и с приборной базой. В Государственном реестре средств измерений отсутствуют приборы, предназначенные для измерения тормозного импульсного излучения с энергией 10...30 МэВ. Единственный более менее подходящий для таких измерений прибор – это дозиметр ДКС-АТ1123 производства фирмы «Атомтех» (Республика Беларусь). Из всего вышесказанного видно, что нерешенных вопросов очень много. В данной статье мы предлагаем решение крайне важного вопроса, относящегося к методике проведения радиационного контроля, которая, согласно [1], должна разрабатываться на стадии проектирования и утверждаться в местных органах Роспотребнадзора.

В ходе профессиональной деятельности сотрудникам Испытательного лабораторного центра и проектного отдела ООО «КАНОН» достаточно часто приходится проводить дозиметрический контроль и проектирование систем лучевой терапии, которые содержат линейный ускоритель. Была разработана и неоднократно апробирована на практике изложенная ниже методология обработки и интерпретации результатов измерений. По нашему мнению, она наиболее объективно отражает суть происходящих физических процессов и реальную радиационную обстановку вокруг процедурной кабинета для лучевой терапии. Исследования проводились на различных системах для лучевой терапии с медицинскими линейными ускорителями производства фирмы «Varian Medical Systems» (США) [5], [6] с энергией фотонного излучения от 6 до 18 МэВ. При проведении радиационного контроля в качестве фантома использовались штатные наборные пластины типа «твердая вода» размерами 30 × 30 см и толщиной по 1 см каждая. Суммарная толщина фантома составляла 30 см, размер поля излучения был 30 × 30 см. Для измерения импульсного тормозного излучения можно использовать дозиметр ДКС-АТ1123

производства фирмы «Атомтех» [4] в режиме измерения дозы импульсного излучения за время длительности одной фракции. Далее измеренное значение дозы сравнивается с рассчитанным пределом дозы (ПД\*) или рассчитывается средняя мощность дозы. Вклад от нейтронного излучения можно измерить дозиметром ДКС-96 с блоком детектирования БДМН-96 [5]. Измеренные вклады суммируются и сравниваются с рассчитанными суммарными значениями ДМД для разных категорий облучаемых лиц и смежных помещений, в которых они находятся.

Как при проектировании, так и при проведении радиационного контроля сбор данных следует начинать с определения недельной дозовой нагрузки за одну смену ( $W_0$ ). Для установок каждого типа она рассчитывается индивидуально, с учетом количества пациентов, получающих сеанс лечения в смену, количества рабочих дней в неделю и средней величины дозы, отпускаемой пациенту за одну процедуру. Ниже, в скобках, в качестве примера приведены реальные усредненные данные по режиму работы отделений лучевой терапии:

- количество пациентов в смену ( $N_0 = 25$ );
- количество рабочих дней в неделю ( $t_0 = 5$  дн.);
- средняя величина дозы, отпускаемой за одну фракцию (один сеанс) ( $D_0 = 4$  Гр) [6];
- количество рабочих недель в году ( $t = 50$  нед.);
- количество рабочих смен в день ( $n_0 = 2$  смен.);
- максимальная мощность дозы в изоцентре при максимальной энергии ( $D = 6$  Гр/мин) [7], [8].

Вышеприведенные усредненные или максимальные численные значения взяты из технической документации на оборудование для лучевой терапии фирмы «Varian Medical Systems» и технических заданий на проектирование.

Недельная рабочая нагрузка ( $W_0$ ) в изоцентре за одну смену работы установки рассчитывается при максимальной энергии фотонного излучения ( $E$ ):

$$W_0 = N_0 \cdot t_0 \cdot D_0.$$

Используя вышеуказанную формулу и реальные данные, получаем, что недельная рабочая нагрузка в одну смену ( $W_0$ ) в изоцентре составляет 500 Гр при работе аппарата в одну смену.

Установки для лучевой терапии обычно работают в две смены, так как потребность в этих процедурах очень большая. В смежных помещениях и на прилегающей территории могут находиться разные категории облучаемых лиц с различной продолжительностью рабочей смены. По линейному закону рассчитывается недельная рабочая нагрузка ( $W$ ) для разных категорий облучаемых лиц с учетом коэффициента сменности ( $n$ ), взятого из [1] (приложение 1, табл. 1):

$$W = 500n.$$

Зная рабочую нагрузку, можно найти время работы ускорителя за год ( $T$ ):

$$T = \frac{W \cdot t}{60 \cdot D},$$

где 60 – числовой коэффициент пересчета часов в минуты.

Одной из важных дозиметрических величин, используемых в радиационном контроле, является значение допустимой мощности дозы в смежных помещениях и на рабочих местах для различных групп и категорий облу-

чаемых лиц. Допустимая мощность дозы для смежных по вертикали и горизонтали помещений определяется их назначением и продолжительностью пребывания разных категорий облучаемых лиц. Продолжительность нахождения персонала и населения в смежных с процедурной помещениях описывается коэффициентом занятости помещения ( $K$ ) [1] (приложение 1, табл. 1). Пределы доз (ПД) для каждой категории облучаемых лиц за год определены НРБ 99/2009 [9]. Все эти данные позволяют рассчитать допустимую мощность дозы (ДМД) в микрозивертах в час для каждого смежного помещения с учетом продолжительности смены и занятости помещения, включая население, по следующей формуле:

$$ДМД = \frac{1000 \cdot ПД}{T \cdot K \cdot p},$$

где ПД – предел дозы за год для разных категорий облучаемых лиц [9];  $K$  – коэффициент занятости помещения [1] (приложение 1, табл. 1);  $T$  – продолжительность облучения для различных категорий облучаемых лиц за год; 1000 – числовой коэффициент перехода от миллизивертов к микрозивертам;  $p$  – коэффициент направленности рабочего пучка излучения  $P \leq 1$ .

Коэффициент направленности в нашем расчете и для многих исполнений медицинских ускорителей принимается равным единице, но его необходимо учитывать в более сложных системах типа «Кибер Нож» (CyberKnife), которые могут облучать под разными углами в верхней полусфере.

Из данных, приведенных в табл. 1, видно, что проектные мощности дозы, приведенные в [1], нельзя использовать при проведении дозиметрического контроля радиационной обстановки при работе с медицинскими ускорителями, так как они не учитывают действительное время работы ускорителя. Приведенные в табл. 1 значения ДМД отвечают требованиям [9] по основным пределам доз за год при работе с медицинскими ускорителями.

Для удобства проведения планового радиационного контроля сотрудниками медицинского учреждения удобнее пользоваться пределом дозы за время одной фракции (ПД\*), так как дозиметр измеряет именно дозу тормозного импульсного излучения за фракцию. Эта величина рассчитывается для всех смежных помещений по следующей формуле:

$$ПД^* = \frac{1000 \cdot ПД}{N_0 \cdot t_0 \cdot t \cdot n \cdot K}.$$

Зная величину ПД\* и время продолжительности одной лечебной фракции (в нашем случае она составляет  $t_{\text{фракции}} = 40$  с), легко получить рассчитанные значения ДМД в контрольных точках, измеренные во время проведения терапевтического сеанса или при дозиметрическом контроле.

Для удобства проведения оперативного радиационного контроля персоналу дозиметрической службы медицинского учреждения и дозиметристам надзорных органов удобнее использовать величину предела дозы за время одной фракции, чтобы в режиме реального времени сделать вывод о радиационной обстановке в смежных с процедурной медицинского ускорителя помещениях. Значения предельно допустимых доз ПД\* за одну фракцию для различных помещений и групп населения и персонала приведены в последнем столбце табл. 1.

Значения проектной ( $P_0$ ), допустимой (ДМД) мощности дозы и допустимой дозы (ПД\*)

Помещение, территория	$K$ , отн. ед.	$n$ , отн. ед.	ПД, мЗв/год	$P_0$ , мкЗв/ч	ДМД, мкЗв/ч	ПД*, мкЗв/за фракцию
Помещения постоянного пребывания персонала группы А [все помещения, входящие в состав отделений, кабинетов лучевой терапии, комната управления (пультовая)]	1	1	20	6	288	3,2
Помещения временного пребывания персонала группы А	0,5	1	20	12	576	6,4
Помещения, смежные по вертикали и горизонтали с рабочей камерой (процедурной) ускорителя, в которых имеются постоянные рабочие места персонала группы Б	1	1,2	5	1,2	60	0,7
Помещения, смежные по вертикали и горизонтали с рабочей камерой (процедурной) ускорителя, без постоянных рабочих мест (холл, гардероб, лестничная площадка, коридор, уборная, кладовая и др.)	0,25	1,2	5	5	240	2,7
Помещения эпизодического пребывания персонала группы Б (технический этаж, подвал, чердак и т. п.)	0,06	1,2	5	20	1000	11,1
Палаты стационара (нерадиологические), смежные по вертикали и горизонтали с отделениями, кабинетами лучевой терапии, помещения эпизодического пребывания лиц, не отнесенных к персоналу, смежные по вертикали и горизонтали с рабочей камерой (процедурной) ускорителя	0,25	2	1	0,6	28,8	0,3
Помещения, в которых имеются постоянные рабочие места лиц, не отнесенных к персоналу	1	1,2	1	0,25	12	0,1
Территория, прилегающая к наружным стенам здания ускорителя	0,12	2	1	1,2	60	0,7
Примечание: $P_0$ – проектная мощность дозы из СанПиН 2.6.1.2573-10 (прил. 1, табл. 1); ДМД – рассчитанная суммарная допустимая мощность дозы при недельной рабочей нагрузке за одну смену 500 Гр/нед.; ПД* – рассчитанная допустимая доза за одну отпускаемую среднюю фракцию 4 Гр.						

## Заключение

В статье представлена методика расчета допустимых значений доз и мощностей доз для помещений, расположенных смежно с процедурной рентгеновского медицинского электронного ускорителя. Показано, что следует переходить от измерений допустимых значений мощностей доз ДМД к измерениям допустимых значений доз в контрольных точках при работе ускорителя в режиме максимальной мощности дозы в изоцентре.

*Авторы статьи выражают огромную благодарность сотрудникам следующих лечебных учреждений: ОАО «Медицина», ФГБУ «Российский научный центр рентгенорадиологии», НИИ нейрохирургии им. Н.Н. Бурденко и сервисному отделу фирмы «Varian Medical Systems» – за предоставленное оборудование, активное участие в измерениях и помощь в понимании медицинских и технических особенностей работы медицинских линейных ускорителей.*

### Список литературы:

- СанПиН 2.6.1.2573-10 Гигиенические требования к размещению и эксплуатации ускорителей электронов с энергией до 100 МэВ.
- Нурлыбаев К., Мартынюк Ю.Н., Каракаш А.И. и др. Радиационная безопасность в лучевой терапии с использованием ускорителей электронов // АНРИ. 2014. № 1 (76). С. 15-21.
- Белогрудов А.А., Владимиров Л.В. Особенности расчета радиационной защиты медицинских линейных ускорителей электронов с энергией выше 10 МэВ // Медицинская техника. 2013. № 5. С. 33-37.
- Дозиметры рентгеновского и гамма-излучений ДКС-АТ1121, ДКС-АТ1121А, ДКС-АТ1123, ДКС-АТ1123А. Руководство по эксплуатации. – М.: НПУП «Атомтех».
- Дозиметры-радиометры ДКС-96. Руководство по эксплуатации. – М.: НПП «Доза».

- Ильин М.А., Сотников В.М., Панышин Г.А. и др. Лучевая терапия средними фракциями периферического немелкоклеточного рака легкого с увеличением эквивалентной суммарной очаговой дозы // Вестник РНЦРР МЗ РФ. 2013. № 11.
- Clinac 2100C/D, 2300C/D, 21EX, iX, Novalis Tx, Trilogy & Silhouette Edition Radiation Leakage Data / Varian Medical Systems.
- Designers“ Desk Reference High Energy Clinac Edition / Varian Medical Systems.
- СанПиН 2.6.1.2523-09 Нормы радиационной безопасности. НРБ 99/2009.

*Лев Владимирович Владимиров,  
д-р техн. наук, профессор,  
руководитель научно-исследовательского сектора,  
кафедра радиационной гигиены,  
Российская медицинская академия  
последипломного образования МЗ России,  
Денис Михайлович Защиринский,  
канд. физ.-мат. наук, начальник ЛРК,  
Олег Сергеевич Сидоров,  
канд. мед. наук, начальник,  
ИЛЦ ООО «КАНОН»,  
г. Москва,  
e-mail: fiz-denis@mail.ru*