

Возможность применения дозиметров со счетчиком Гейгера–Мюллера для дозиметрии импульсного излучения

Н.В. Титов

Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

В настоящее время широкое распространение в Российской Федерации получили медицинские установки для лучевой терапии на основе ускорителей электронов с энергией 18–23 МэВ. Они генерируют импульсное тормозное излучение с максимальной энергией около 20 МэВ. В Государственном реестре средств измерений в настоящее время отсутствуют дозиметрические приборы, предназначенные для дозиметрии импульсного тормозного излучения такой энергии. Наиболее широко используемый для этой цели дозиметр рентгеновского и гамма-излучения ДКС-АТ1123 позволяет проводить измерение импульсного тормозного излучения с энергией только до 10 МэВ, с основной погрешностью измерений в области энергий от 3 до 10 МэВ – 50%. Но альтернативы в настоящее время нет. И хотя вклад в дозу этой части спектра тормозного излучения не слишком велик, данную ситуацию нельзя признать нормальной. В то же время в Государственном реестре средств измерений имеется дозиметр ДКГ-РМ1621, предназначенный для дозиметрии рентгеновского и гамма-излучения в диапазоне энергий от 15 кэВ до 20 МэВ. Но он не предназначен для дозиметрии импульсных излучений. В настоящей работе предпринята попытка обосновать возможность использования данного дозиметра для дозиметрии импульсного тормозного излучения и определить диапазон мощностей доз, в котором результаты измерений данным дозиметром корректны. В качестве источника импульсного тормозного излучения для проведения этого исследования использовался инспекционно-досмотровый комплекс СТ-2630М производства ООО «Скантроник Системс», генерирующий импульсное тормозное излучение с максимальной энергией 3,5 МэВ и 6 МэВ. В этой области энергий дозиметр ДКС-АТ1123 позволяет получать корректные результаты измерения, и он использовался в качестве реперного прибора. Полученные результаты показали, что для данного источника дозиметр ДКГ-РМ1621 позволяет получить результаты с дополнительной погрешностью не более 15% при средней мощности дозы тормозного излучения до 25 мкЗв/ч, что в большинстве случаев вполне достаточно для проведения радиационного контроля помещений, смежных с процедурной медицинского ускорителя электронов. При использовании поправочных коэффициентов, учитывающих влияние мертвого времени дозиметра на результаты измерений, область получения корректных результатов может быть расширена до 100 мкЗв/ч.

Ключевые слова: импульсные источники, дозиметр, инспекционно-досмотровый комплекс.

Введение

Методам дозиметрии импульсного излучения посвящено достаточно много публикаций. Наиболее полно этот вопрос рассмотрен в докладе 34 МКРЕ «Дозиметрия импульсного излучения» [1]. Особенности дозиметрии современных импульсных источников рентгеновского и тормозного излучения посвящена работа [2]. В этих работах делается вывод о том, что детекторы, работающие в счетном режиме, включая счетчики Гейгера-Мюллера, непригодны для измерения импульсного излучения, т.к. из-за наличия большого мертвого времени способны регистрировать только частоту следования импульсов. Это действительно так, но только для достаточно больших мощностей дозы. В области сравнительно небольших

мощностей дозы, которая чаще всего и представляет наибольший интерес при проведении радиационного контроля, использование дозиметров со счетчиками Гейгера-Мюллера для дозиметрии импульсного излучения представляется вполне возможным [3]. Настоящая статья посвящена изучению возможности использования дозиметров со счетчиками Гейгера-Мюллера для дозиметрии импульсного тормозного излучения.

В настоящее время в Российской Федерации широко используются медицинские установки для лучевой терапии, источником ионизирующего излучения в которых служат ускорители электронов с энергией до 23 МэВ. Они генерируют импульсное тормозное излучение с максимальной энергией около 20 МэВ за счет взаимодействия

Титов Николай Владимирович

Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П. В. Рамзаева.

Адрес для переписки: 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: pustoshka@inbox.ru

пучка ускоренных электронов с мишенью ускорителя. Длительность импульса у таких ускорителей составляет 1–3 мкс, а частота следования импульсов – 50–400 Гц. Подобные установки создают интенсивные пучки тормозного излучения и размещаются в специальных защитных каньонах, обеспечивающих радиационную защиту людей, находящихся в смежных помещениях и на прилегающей территории. Для обеспечения радиационной безопасности работников медучреждений, в которых функционируют подобные установки, необходимо проведение периодического радиационного контроля. Но в Государственном реестре средств измерений в настоящее время отсутствуют дозиметрические приборы, предназначенные для дозиметрии импульсного тормозного излучения такой энергии. Наиболее широко используемый в Российской Федерации для этой цели дозиметр рентгеновского и гамма-излучения ДКС-АТ1123 производства фирмы АТОМТЕХ (Республика Беларусь) позволяет измерять мощность амбиентного эквивалента дозы импульсного тормозного излучения с энергией до 10 МэВ, с основной погрешностью измерений в области энергий от 3 до 10 МэВ – 50%. Т.е. правомерность его использования для проведения радиационного контроля на ускорителях электронов с энергией, вдвое превышающей верхнюю границу допустимого энергетического диапазона данного прибора, вызывает большие сомнения. Но альтернативы в настоящее время в России нет, и приходится использовать дозиметр ДКС-АТ1123 [4] для проведения радиационного контроля медицинских ускорителей электронов. Т.е. фактически данный вид радиационного контроля в Российской Федерации проводится дозиметрическими приборами, не вполне пригодными для проведения данного вида измерений. Результаты проводимых измерений получаются заниженными, и их нельзя считать вполне корректными. Приходится вводить большие погрешности, приближающиеся к 100%, и учитывать их при сравнении результатов измерений с нормативными величинами.

В то же время в Государственном реестре средств измерений имеется дозиметр рентгеновского и гамма-излучения ДКГ-РМ1621 [5] производства ООО «Полимастер» (Республика Беларусь), предназначенный для измерения персонального эквивалента дозы и мощности персонального эквивалента дозы рентгеновского и гамма-излучения в диапазоне энергий от 15 кэВ до 20 МэВ. Но этот прибор не предназначен для дозиметрии импульсных излучений. Причиной этого является достаточно большое мертвое время счетчиков Гейгера-Мюллера, составляющее около 100 мкс и значительно превышающее длительность импульсов излучения ускорителя. Поэтому они принципиально не могут регистрировать более одного события за импульс ускорителя, независимо от дозы излучения в импульсе. Но при мощности дозы тормозного излучения ускорителя, при которой счетчик регистрирует не более одного события на 10 и более импульсов ускорителя, результаты измерений, полученные с использованием дозиметров со счетчиками Гейгера-Мюллера, могут быть достаточно близки к реальным величинам, и при этом сохраняется энергетическая зависимость показаний такого дозиметра, обеспечивающая необходимый диапазон используемых энергий. Подобные эксперименты проводились и другими авторами [3] и демонстри-

руют реальность и перспективность данного подхода. Дозиметры на основе счетчиков Гейгера-Мюллера более компактны, более дешевы и долговечны и при обеспечении достаточно широкого энергетического диапазона регистрации излучения могли бы с успехом использоваться для проведения радиационного контроля на медицинских терапевтических установках с ускорителями электронов высокой энергии.

В настоящей работе предпринята попытка обосновать возможность использования дозиметра ДКГ-РМ1621 для дозиметрии импульсного тормозного излучения медицинских ускорителей электронов с энергией до 20 МэВ. Автор попытался также определить диапазон мощностей доз, в котором результаты измерений данным дозиметром достаточно корректны. В качестве источника импульсного тормозного излучения для проведения данного исследования использовался инспекционно-досмотровый комплекс СТ-2630М производства ООО «Скантроник Системс», генерирующий импульсное тормозное излучение с максимальной энергией 3,5 МэВ и 6 МэВ. Эта область энергий соответствует техническим характеристикам дозиметра ДКС-АТ1123, и результаты проведенных с его помощью измерений для данного источника принимались в качестве реперных при проведении данного исследования.

Цель исследования – обоснование возможности использования дозиметра ДКГ-РМ1621 для проведения радиационного контроля на медицинских терапевтических установках с ускорителями электронов с максимальной энергией до 20 МэВ, а также определение диапазона мощностей доз, в котором возможно получение корректных результатов измерения данным дозиметром.

Материалы и методы

В качестве детектора в дозиметре ДКГ-РМ1621 используется счетчик Гейгера-Мюллера со специально подобранными фильтрами, обеспечивающими энергетическую зависимость результатов измерения им персонального эквивалента дозы не более 30% по отношению к энергии 0,66 МэВ.

Чувствительность дозиметра можно охарактеризовать количеством срабатываний счетчика на единицу дозы излучения (K , 1/нЗв). Параметры контролируемого поля импульсного тормозного излучения можно охарактеризовать длительностью импульса излучения (τ , мкс), частотой следования импульсов излучения (ω , 1/с) и дозой в импульсе излучения (D_1 , нЗв). Средняя мощность дозы импульсного излучения (H), являющаяся измеряемой величиной, равна произведению дозы в импульсе излучения на частоту следования импульсов:

$$H = D_1 * \omega \text{ нЗв/с} = 3,6 * D_1 * \omega, \text{ мкЗв/ч} \quad (1)$$

Вероятность срабатывания счетчика при воздействии импульса излучения при дозе в импульсе D_1 равна:

$$p = D_1 * K = H * K / (3,6 * \omega) \quad (2)$$

Вероятность двух срабатываний счетчика за один импульс излучения в предположении нулевого мертвого времени счетчика равна p^2 .

Среднее число срабатываний счетчика за один импульс излучения при дозе в импульсе D_1 и нулевом мертвом времени счетчика составило бы:

$$N = p + p^2 = p * (1 + p) \quad (3)$$

Таким образом, занижение результатов измерения за счет наличия мертвого времени счетчика, исключающего возможность двух срабатываний за время одного импульса излучения, характеризуется коэффициентом $1/(1 + p)$. С учетом этого, можно ожидать, что при $p \leq 0,17$ занижение результатов измерения мощности дозы импульсного излучения дозиметром со счетчиком Гейгера-Мюллера за счет наличия у него мертвого времени не превысит 15%. Используя выражения (2), получим максимальное значение средней мощности дозы импульсного тормозного излучения, при котором выполняется это условие:

$$H_{max} = 0,61 * \omega / K, \text{ мкЗв/ч} \quad (4)$$

Т.е. данная величина пропорциональна частоте следования импульсов излучения и обратнопропорциональна чувствительности счетчика. При $p \geq 1$ показания дозиметра не будут изменяться при дальнейшем возрастании мощности дозы и частота срабатывания счетчика будет постоянна и равна частоте следования импульсов излучения. В диапазоне $0,17 \leq p < 1$ можно ожидать получения разумных результатов при умножении результата измерения на поправочный коэффициент $(1+p)$, учитывающий влияние мертвого времени счетчика.

Для проверки реальности вышеприведенных предположений было проведено экспериментальное исследование с целью получения зависимости показаний дозиметра ДКГ-PM1621 от мощности дозы импульсного тормозного излучения. Основная идея данного исследования заключалась в том, чтобы провести параллельные измерения двумя дозиметрами (ДКГ-PM1621 и ДКС-AT1123) мощности дозы импульсного тормозного излучения для широкого спектра мощностей дозы в одних и тех же точках и получить зависимость показаний дозиметра ДКГ-PM1621 от мощности амбиентного эквивалента дозы тормозного излучения, измеренной при помощи дозиметра ДКС-AT1123, который в данном исследовании считался образцовым.

Оба дозиметра зарегистрированы в Государственном реестре средств измерений. Некоторые их характеристики приведены в таблице.

В качестве источника излучения для проведения исследований использовался ускоритель электронов мобильного инспекционно-досмотрового комплекса СТ-2630М производства ООО «Скантроник Системс» (далее – МИДК). Измерения проводились в направлении, противоположном пучку излучения МИДК, для обеспечения пространственной однородности поля излучения. При проведении измерений длительность импульсов излучения составляла 2 мкс, а частота следования импульсов – 100 Гц. Измерения проводились для двух энергий ускоренных электронов 3,5 МэВ и 6 МэВ. Данный источник был выбран потому, что его основные характеристики, кроме энергии ускоренных электронов, близки к соответствующим характеристикам медицинских ускорителей электронов, а энергии электронов соответствуют диапозону энергий тормозного излучения, которые могут корректно измеряться дозиметром ДКС-AT1123, что позволило использовать его в данном исследовании в качестве образцового.

Изменение мощности дозы в точке измерения достигалось изменением расстояния до источника. Измерения дозиметром ДКС-AT1123 в каждой точке проводились до получения статистической погрешности измерений не более 5%. Для дозиметра ДКГ-PM1621 фиксировались 5 результатов измерения, по которым определялось среднее значение и среднеквадратичное отклонение для каждой точки измерения. Статистическая погрешность измерений данным дозиметром также не превышала 5%.

Предварительно выбирались и размечались точки измерения, средняя мощность амбиентного эквивалента дозы в которых изменялась от 1 мкЗв/ч до 200 мкЗв/ч. При средней мощности дозы 200 мкЗв/ч = 56 нЗв/с и частоте следования импульсов тормозного излучения 100 Гц доза в импульсе составит 0,56 нЗв. С учетом длительности импульса излучения 2 мкс, это соответствует мощности дозы в импульсе 0,28 мЗв/с, что значительно меньше допустимой для дозиметра ДКС-AT1123 величины 1,3 Зв/с.

Дозиметры ДКС-AT1123 и ДКГ-PM1621 по очереди размещались в каждой точке измерения так, чтобы центр детектора каждого из них находился в одной и той же точ-

Характеристики использовавшихся в данной работе дозиметров рентгеновского и гамма-излучения

Таблица

[Table

Characteristics of the dosimeters for the X-ray and gamma exposure]

Параметр [Parameter]	ДКС-AT1123 [DKS-AT1123]	ДКГ-PM1621 [DKG-PM1621]
Диапазон измерения мощности дозы [Dose rate measurement range]	0,1 мкЗв/ч – 10 Зв/ч [0,1 μSv/h – 10 Sv/h]	0,1 мкЗв/ч – 100 мЗв/ч [0,1 μSv/h – 100 mSv/h]
Диапазон регистрируемых энергий [Energy range]	15 кэВ – 10 МэВ [15 KeV – 10 MeV]	10 кэВ – 20 МэВ [15 KeV – 20 MeV]
Энергетическая зависимость относительно энергии 0,662 МэВ [Energy dependence relative to the 0,662 MeV energy]	±50%	±30%
Пределы основной относительной погрешности измерений [Boundaries of the main relative uncertainty of the measurements]	Для импульсного излучения 30% [30% for the pulsed exposure]	При мощности дозы более 1 мкЗв/ч < 17% [<17% for the dose rate above 1 μSv/h]
Возможность измерения импульсного излучения [Possibility of measurement of the pulsed exposure]	Да [Yes]	Нет [No]

ке. Проводились измерения мощности амбиентного эквивалента дозы дозиметром ДКС-АТ1123 и мощности персонального эквивалента дозы дозиметром ДКГ-РМ1621 в каждой точке измерения с регистрацией полученных результатов. При этом датчик дозиметра ДКС-АТ1123 направлялся на источник, а дозиметр ДКГ-РМ1621 размещался так, чтобы фильтр из тканеэквивалентного материала находился со стороны источника.

Результаты и обсуждение

Результаты измерений средней мощности амбиентного эквивалента дозы импульсного тормозного излучения с максимальными энергиями 3,5 МэВ и 6 МэВ, проведенных обоими использовавшимися в данной работе дозиметрами, представлены на рисунках 1 и 2.

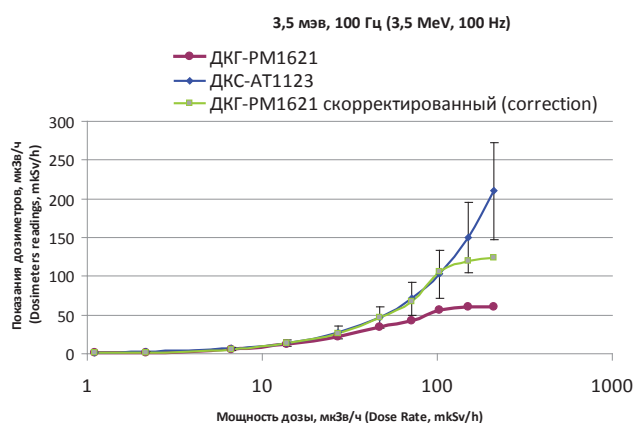


Рис. 1. Результаты измерений импульсного тормозного излучения с максимальной энергией 3,5 МэВ

[Fig. 1. Results of the measurements of the pulsed bremsstrahlung radiation with maximum energy of 3,5 MeV]

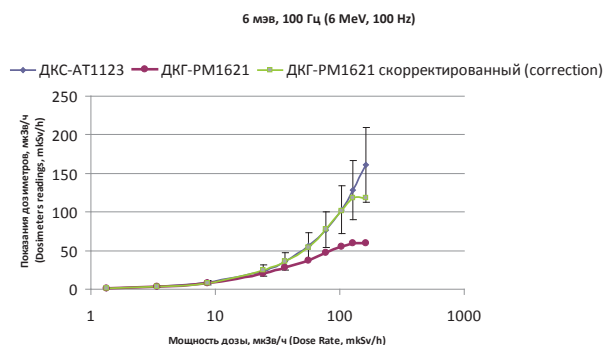


Рис. 2. Результаты измерений импульсного тормозного излучения с максимальной энергией 6 МэВ

[Fig. 2. Results of the measurements of the pulsed bremsstrahlung radiation with maximum energy of 6 MeV]

Как видно из представленных рисунков, результаты измерений дозиметром ДКГ-РМ1621 для обеих максимальных энергий тормозного излучения отличаются от реперных данных, полученных с использованием дозиметра ДКС-АТ1123, не более 15% в области мощностей дозы от 1 до 20 мкЗв/ч и практически не зависят от энергии излучения. Начиная со 120 мкЗв/ч, показания дозиметра ДКГ-РМ1621 для обоих источников перестают зависеть

от мощности дозы. Начиная с этой мощности дозы, срабатывание счетчика дозиметра происходит для каждого импульса излучения, т.е. вероятность срабатывания равна $p = 1$. Используя выражение (2), мы можем определить параметр K – чувствительность счетчика дозиметра:

$$K = 3,6 * \omega * p / H = 3,6 * 100 * 1 / 120 = 3,0 \text{ нЗв}^{-1}. \quad (5)$$

С учетом выражений (2) и (3), скорректированное значение показаний дозиметра ДКГ-РМ1621 (X), учитывающее невозможность двойных срабатываний счетчика за один импульс источника ($X_{\text{скорр}}$), имеет вид:

$$X_{\text{скорр}} = X * (1 + p) = X * (1 + H * K / (3,6 * \omega)) \quad (6)$$

Используя в качестве оценки H величину $X_{\text{скорр}}$ получим:

$$X_{\text{скорр}} = X / (1 - X * K / (3,6 * \omega)) \quad (7)$$

При $K = 3,0 \text{ нЗв}^{-1}$ и $\omega = 100 \text{ с}^{-1}$ получаем:

$$X_{\text{скорр}} = X / (1 - X / 120) \quad (8)$$

На рисунках 1 и 2 представлены скорректированные с учетом данного выражения величины измеренной с помощью дозиметра ДКГ-РМ1621 мощности дозы импульсного тормозного излучения. Как видно, они отличаются не более чем на 10% от реперных значений мощности дозы и не выходят за пределы погрешности результатов измерений дозиметром ДКС-АТ1123 в диапазоне мощностей доз от 1 до 100 мкЗв/ч.

Эта область практически полностью покрывает диапазон мощностей доз, встречающихся при проведении радиационного контроля лучевых диагностических установок и медицинских ускорителей электронов.

Заключение

Проведенное исследование подтверждает перспективность продолжения работ по разработке методик проведения радиационного контроля различных установок с импульсными источниками рентгеновского и тормозного излучения с использованием дозиметров со счетчиками Гейгера-Мюллера.

Полученные результаты показывают, что использование дозиметра ДКГ-РМ1621 для радиационного контроля импульсных источников тормозного излучения возможно в определенном диапазоне мощностей доз.

Автор планирует продолжить исследования в этом направлении для других используемых на практике импульсных источников тормозного и рентгеновского излучения.

Литература

1. ICRU Report 34, The Dosimetry of pulsed radiation, 1982.
2. Мартынюк, Ю.Н. Дозиметрия импульсного излучения / Ю.Н. Мартынюк, К. Нурлыбаев, А.А. Ревков // АНРИ. – 2018. – № 1 (92). – С. 2-11.
3. Response of Active Electronic Radiation Monitors in Pulsed X-ray Beams from Linacs. (Peter D Harty, Genesan Ramanathan. Australian Radiation Protection & Nuclear Safety Agency 619 Lower Plenty Road, Yallambie, Victoria 3085)
4. Дозиметры рентгеновского и гамма излучения ДКС-АТ1121, ДКС-АТ1123. Руководство по эксплуатации.
5. ДКГ-РМ1621. Руководство по эксплуатации.

Поступила: 11.03.2019 г.

Титов Николай Владимирович – младший научный сотрудник лаборатории внешнего облучения Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева, Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. **Адрес для переписки:** 197101, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: pustoshka@inbox.ru

Для цитирования: Титов Н.В. Возможность применения дозиметров со счетчиком Гейгера-Мюллера для дозиметрии импульсного излучения // Радиационная гигиена. – 2019. – Т.12, № 2. – С. 76-80. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-2-76-80

Prospects for the use of the dosimeters with Geiger-Muller counters for the dosimetry of the pulse emission

Nikolay V. Titov

Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being, Saint-Petersburg, Russia

At the current time radiation therapy units based on the linear accelerators with the energy range of 18-23 MeV are common in the Russian Federation. They generate pulsed bremsstrahlung radiation with the maximum energy of approximately 20 MeV. The State Register of measuring devices contains no dosimetry equipment for the measurement of the pulsed bremsstrahlung radiation for such energies. The most common dosimeter of X-ray and gamma radiation, DKS-1123AT, allows measuring the pulsed bremsstrahlung radiation up to 10 MeV, with the main uncertainty of measurement in the range of 3-10 MeV of 50%. No alternative solutions exist at the current time. Although the contribution of this part of the bremsstrahlung radiation spectra is not high, the situation requires actions. However, the State Register of measuring devices includes the DKG-RM1621 dosimeter for the measurement of X-ray and gamma radiation in the energy range of 15 KeV – 20 MeV, but it is now designed for the measurement of the pulse emissions. The current study is focused on the evaluation of the use of the DKG-RM1621 dosimeter for the measurement of the pulsed bremsstrahlung radiation and on the estimation of the dose rate range, where the results of the measurements would be valid. The study was performed using the inspection-security complex ST-2630M (JSC “Scantronix systems”) as the source of the pulsed bremsstrahlung radiation with the maximum energy of 3,5 and 6 MeV. This energy range is valid for the DKS-1123AT dosimeter, allowing using it for the comparison. The results indicate that, for the current source, the DKG-RM1621 dosimeter allows performing the measurements with the additional uncertainty up to 15%, with the mean dose rate of pulsed bremsstrahlung radiation up to 25 μSv/h. That is acceptable for the radiation control of the rooms adjacent to the location of a linear accelerator. The use of the additional coefficients to consider the impact of the idle time of the detector on the results of the measurements allows measuring dose rates up to 100 μSv/h.

Key words: pulsed radiation sources, dosimeter, inspection complex.

References

- ICRU Report 34, The Dosimetry of pulsed radiation, 1982.
- Martynyuk Yu.N., Nurlybaev K., Revkov A.A. Dosimetry of the pulsed exposure. ANRI = ANRI, 2018, № 1 (92), pp. 2-11. (In Russian).
- Response of Active Electronic Radiation Monitors in Pulsed X-ray Beams from Linacs. (Peter D Harty, Genesan Ramanathan. Australian Radiation Protection & Nuclear Safety Agency 619 Lower Plenty Road, Yallambie, Victoria 3085)
- Dosimeters of the X-ray and gamma radiation DKS-AT1121, DKS-AT1123. User manual. (In Russian).
- DKG-RM1621. User manual. (In Russian).

Received: March 11, 2019

For correspondence: Nikolay V. Titov – Junior Researcher of the Laboratory of External Exposure, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being (Mira Str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russia. E-mail: pustoshka@inbox.ru)

For citation: Titov N.V. Prospects for the use of the dosimeters with Geiger-Muller counters for the dosimetry of the pulse emission. Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene, 2019, Vol. 12, No. 2, pp. 76-80. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426x-2019-12-2-76-80

Nikolay V. Titov

Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev

Address for correspondence: Mira str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russia; E-mail: pustoshka@inbox.ru