

## Методика измерения мощности дозы импульсного тормозного излучения дозиметрами гамма-излучения со счетчиком Гейгера–Мюллера

Н. В. Титов ✉

Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены  
им. профессора П. В. Рамзаева, Санкт-Петербург, Россия

✉ [pustoshka@inbox.ru](mailto:pustoshka@inbox.ru)

### Аннотация

**Введение.** Проведение производственного радиационного контроля источников импульсного тормозного излучения сопряжено с рядом проблем. В России существует всего 3 дозиметра, предназначенных для дозиметрии импульсного тормозного излучения с длительностью импульса менее 10 мкс. К тому же они имеют ряд существенных ограничений по энергетическому диапазону (10 МэВ) и минимальной длительности импульсов (10 нс) и достаточно высокую стоимость. При этом имеется дозиметр ДКГ-РМ1621 со счетчиком Гейгера–Мюллера для дозиметрии фотонного излучения с энергий до 20 МэВ, но он не предназначен для дозиметрии импульсных излучений.

**Цель работы.** Разработка методики проведения радиационного контроля источников импульсного тормозного излучения с использованием дозиметров со счетчиками Гейгера–Мюллера.

**Материалы и методы.** В 2021 г. проведены измерения мощности дозы импульсного тормозного излучения с максимальной энергией 3.0 МэВ при частоте следования импульсов 50, 100, 150, 200, 250, 300 и 400 Гц дозиметрами ДКС-АТ1123 (в качестве образцового) и МКС-АТ117М со счетчиком Гейгера–Мюллера.

**Результаты.** Разработана методика корректировки результатов измерений мощности дозы импульсного тормозного излучения дозиметром со счетчиком Гейгера–Мюллера, позволяющая измерять мощность дозы импульсного тормозного излучения с дополнительной погрешностью менее 15 % в практически значимой области мощностей доз. Для дозиметра МКС-АТ117М при частоте следования импульсов 400 Гц данное значение составило 320 мкЗв/ч, что вполне достаточно для большинства практических задач по радиационному контролю.

**Заключение.** Показана целесообразность и возможность успешного применения дозиметров со счетчиками Гейгера–Мюллера для дозиметрии импульсного тормозного излучения с использованием предложенной методики измерений с ограничением по максимально измеряемой мощности дозы.

**Ключевые слова:** мощность дозы, импульсное тормозное излучение, счетчик Гейгера–Мюллера, методика измерений

**Для цитирования:** Титов Н. В. Методика измерения мощности дозы импульсного тормозного излучения дозиметрами гамма-излучения со счетчиком Гейгера–Мюллера // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2024. Т. 27, № 3. С. 97–107. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-3-97-107

**Конфликт интересов.** Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 20.03.2024; принята к публикации после рецензирования 15.05.2024; опубликована онлайн 28.06.2024



## Methodology for Measuring the Dose Rate of Pulsed Bremsstrahlung Radiation using Gamma Radiation Dosimeters with Geiger–Muller Counter

Nikolay V. Titov ✉

St Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene  
n. a. Professor P. V. Ramzaev, St Petersburg, Russia

✉ pustoshka@inbox.ru

### Abstract

**Introduction.** Industrial monitoring of pulsed bremsstrahlung radiation is associated with a number of challenges. Russia produces only three dosimeters that can be used for measuring pulsed bremsstrahlung radiation with a pulse duration of less than 10  $\mu$ s. These dosimeters, in addition to being rather expensive, have a number of significant restrictions on the energy range (10 MeV) and the minimum pulse duration (10 ns). The DKG-RM1621 dosimeter with a Geiger–Muller counter can be used for dosimetry of photon radiation with energies up to 20 MeV. However, this device is not intended for dosimetry of pulsed radiation.

**Aim.** Development of a methodology for conducting radiation monitoring of pulsed bremsstrahlung radiation sources using dosimeters with Geiger–Muller counters.

**Materials and methods.** In 2021, measurements of the dose rate of pulsed bremsstrahlung radiation with a maximum energy of 3.0 MeV at pulse repetition rates of 50, 100, 150, 200, 250, 300, and 400 Hz were carried out using DKS-AT1123 (as a reference) and MKS-AT117M dosimeters with a Geiger–Muller counter.

**Results.** A technique was developed for correcting the results of measuring the dose rate of pulsed bremsstrahlung radiation by a dosimeter equipped with a Geiger–Muller counter, which allows the dose rate of pulsed bremsstrahlung radiation to be measured with an additional error of less than 15 % in a practically significant range of dose rates. For the MKS-AT117M dosimeter at a pulse repetition rate of 400 Hz, this value was 320  $\mu$ Sv/h, which is sufficient for most practical tasks in radiation monitoring.

**Conclusion.** The feasibility and possibility of successful application of dosimeters with Geiger–Muller counters for dosimetry of pulsed bremsstrahlung radiation using the proposed measurement technique with a limitation on the maximum measured dose rate is shown.

**Keywords:** dose rate, pulsed bremsstrahlung, Geiger–Muller counter, measurement technique

**For citation:** Titov N. V. Methodology for Measuring the Dose Rate of Pulsed Bremsstrahlung Radiation using Gamma Radiation Dosimeters with Geiger–Muller Counter. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2024, vol. 27, no. 3, pp. 97–107. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-3-97-107

**Conflict of interest.** The author declares no conflicts of interest.

Submitted 20.03.2024; accepted 15.05.2024; published online 28.06.2024

**Введение.** В Российской Федерации широко используются установки с источниками импульсного тормозного излучения (ИТИ). К ним относятся установки с ускорителями электронов для стерилизации различных видов продукции, для досмотра крупногабаритных грузов, для лучевой терапии [1] и диагностики пациентов [2], рентгеновские установки для неразрушающего контроля материалов и изделий. Проведение производственного радиационного контроля при эксплуатации таких установок сопряжено с рядом проблем [3–5]. В государственном реестре средств изме-

рений имеется всего 3 дозиметра, предназначенных для дозиметрии ИТИ длительностью менее 10 мкс [6], которые к тому же имеют ряд существенных ограничений по энергетическому диапазону и минимальной длительности импульсов, а также достаточно высокую стоимость. Дозиметры рентгеновского и гамма-излучения ДКС-АТ1123, ДКС-96 и RAMION [7] позволяют измерять мощность амбиентной дозы (МАД) ИТИ с максимальной энергией не более 10 МэВ при длительности импульса излучения не менее 10 нс. Кроме того, дозиметр RAMION имеет минимально измеримую МАД

1.0 мкЗв/ч, что делает его малопригодным для производственного радиационного контроля. Производство дозиметра ДКС-96 в настоящее время прекращено. Считается, что счетчики Гейгера–Мюллера непригодны для измерения импульсных излучений [3, 8], поскольку, начиная с некоторого значения МАД, их показания определяются только частотой следования импульсов источника. Тем не менее, для МАД, не превышающих некоторого порогового значения, этот эффект может быть несущественен [9]. Другими словами, вопрос заключается в том, в каком диапазоне мощностей доз показания таких дозиметров являются корректными и от чего зависит верхняя граница данного диапазона. Попытки использования дозиметров со счетчиками Гейгера–Мюллера (ГМД) для дозиметрии ИТИ предпринимались ранее и показали перспективность данного подхода. Так в [9] использовали ГМД для дозиметрии тормозного излучения импульсного ускорителя электронов при длительности импульса 1 мкс и энергии ускоренных электронов 6, 10 и 18 МэВ для мощностей дозы до 90 мкЗв/ч, но зависимость данной величины от частоты следования импульсов не рассматривалась. В [10] исследовали диапазоны МАД источников ИТИ, при которых возможно использование электронных дозиметров, но не рассматривали возможность расширения этого диапазона. В [11–13] приводятся рекомендации по использованию электронных дозиметров при определенных ограничениях по длительности импульсов, частоте их следования, мощности дозы в импульсе и мертвому времени датчика дозиметра. Имеются также серьезные проблемы по формированию тестовых полей для калибровки дозиметров в импульсных полях излучения [14, 15].

Автором данной статьи ранее были проведены исследования зависимости погрешности результатов измерения ГМД ДКГ-PM1621 МАД ИТИ с максимальной энергией 6 и 10 МэВ от частоты следования импульсов при длительности импульса 2...3 мкс [16]. Обоснована перспективность данного направления исследований. На установках с ускорителями электронов МАД ИТИ на рабочих местах персонала и в смежных помещениях составляет от 0.1 до 300 мкЗв/ч. В описываемой работе пока-

зано, что получение корректных результатов в этом диапазоне МАД с использованием ГМД вполне возможно.

Похожая ситуация сложилась и в радиационном контроле импульсных рентгеновских дефектоскопов [17]. Дозиметр ДКС-АТ1123 предназначен для дозиметрии ИТИ при длительности импульса не менее 10 нс, а в настоящее время используются рентгеновские дефектоскопы и медицинские рентгенодиагностические аппараты [2] с длительностью импульса излучения 1...2 нс. Дозиметрические приборы, предназначенные для измерения таких излучений, в Государственном реестре средств измерений отсутствуют. В то же время, с учетом физических принципов работы счетчиков Гейгера–Мюллера, для них отсутствуют ограничения на длительность импульсов излучения менее 10 нс, и, как было показано авторами ранее [16], для радиационного контроля таких источников вполне возможно использование ГМД. Допустимое значение МАД рентгеновского излучения на рабочих местах дефектоскопов не превышает 40 мкЗв/ч, а на границе зоны ограничения доступа – 4 мкЗв/ч. Как было показано в предыдущих исследованиях, получение корректных результатов в этом диапазоне МАД с использованием ГМД также вполне возможно.

Кроме того ГМД существенно дешевле, легче и надежнее других типов дозиметров, а также значительно чаще используются в различных организациях. Поэтому наличие методики радиационного контроля установок с источниками ИТИ с использованием ГМД позволит значительно упростить проведение такого контроля, а для источников с энергией более 10 МэВ и с длительностью импульса менее 10 нс – может стать единственным на сегодняшний день реальным методом его проведения.

Цель работы, описываемой в данной статье, – создание методики радиационного контроля установок с источниками ИТИ с использованием ГМД в практически значимой области мощностей дозы при нормальной эксплуатации таких установок.

**Материалы и методы.** В рамках описываемой работы были проведены экспериментальные исследования на импульсном ускорителе электронов УЭЛР-8-2-Д с максимальной энер-

гией 3.0 МэВ при частоте следования импульсов от 50 до 400 Гц при длительности импульса 2 мкс. Пучок ускоренных электронов падал на вольфрамовую мишень и создавал пучок ИТИ. Измерения проводились двумя дозиметрами: ДКС-АТ1123 (далее ДКС), использовавшимся в качестве образцового, и ГМД типа МКС-АТ117М с датчиком БДКГ-01 (далее МКС). Оба дозиметра размещались в непосредственной близости друг от друга на расстоянии 5 м от мишени ускорителя на высоте 1 м от пола экспериментального зала. МАД в точке измерения варьировалась изменением тока пучка ускоренных электронов. Результаты измерений дозиметрами считывались с дистанционных пультов управления, расположенных в пультовой.

Измерения проводились для частоты следования импульсов излучения ускорителя 50, 100, 150, 200, 250, 300 и 400 Гц. Мощность дозы задавалась с некоторым шагом от нуля до значения, в 2–3 раза превышающего максимальные показания дозиметра МКС ("плато") для каждой частоты следования импульсов.

Для выбранных параметров поля излучения ДКС мог считаться образцовым, так как они соответствовали его области измерений и по длительности импульса, и по энергии излучения. Основная погрешность измерения МАД ИТИ для данного дозиметра не превышает 30 %, а энергетическая зависимость чувствительности в области энергий излучения от 0.06 до 3.0 МэВ относительно чувствительности для энергии 0.66 МэВ не превышает  $\pm 25$  %. МКС предназначен для дозиметрии гамма-излучения в диапазоне энергий от 0.06 до 3.0 МэВ с основной относительной погрешностью не более  $\pm 20$  %. Энергетическая зависимость чувствительности датчика МКС в этой области энергий относительно чувствительности для энергии 0.66 МэВ не превышает  $-35 \dots +25$  %. По экспериментальным данным строились зависимости результатов измерений с использованием МКС по отношению к образцовым, полученным в тех же условиях измерений с помощью ДКС, от МАД ИТИ. Зависимости строились для всех используемых частот следования импульсов.

Корректировка результатов измерений проводилась по методике, разработанной с использованием следующих соображений.

Как известно, мертвое время счетчиков Гейгера–Мюллера  $\tau$ , равное  $10^{-5} \dots 10^{-4}$  с [18], приводит к тому, что у них имеются принципиальные ограничения на максимальные значения измеряемой мощности дозы. По мере того как частота срабатываний счетчика приближается к максимально возможной, равной  $1/\tau$  [18], дозиметр начинает существенно занижать результаты измерения, и после достижения данной частоты срабатывания счетчика результаты измерения вообще перестают изменяться. Для компенсации влияния мертвого времени счетчика на показания дозиметра в области частот срабатывания счетчика менее  $1/\tau$  [18] вносят поправки, учитывающие реальное время, в течение которого счетчик чувствителен к излучению. Измеренную частоту срабатываний счетчика  $N_{\text{изм}}$  корректируют с помощью соотношения

$$N_{\text{кор}} = N_{\text{изм}} / (1 - N_{\text{изм}} \tau).$$

При дозиметрии импульсных излучений данный эффект становится еще более значимым, так как ограничения частоты срабатываний относятся только ко времени генерации импульсов излучения. При длительности импульса излучения  $T$ , значительно большей мертвого времени счетчика, максимальная частота срабатываний счетчика

$$N_{\text{max}} = Tf / \tau,$$

где  $f$  – частота следования импульсов излучения.

Таким образом, максимальная частота срабатываний счетчика при регистрации импульсного излучения пропорциональна произведению  $Tf$ , т. е. доле времени, при котором происходит генерация импульсов излучения.

Для компенсации мертвого времени и в этом случае можно использовать такое же соотношение, как и для непрерывного излучения, но оно будет относиться не ко всему времени, а только к той его части, в которую происходит генерация излучения:

$$N_{\text{кор}} = N_{\text{изм}} / [1 - N_{\text{изм}} \tau / (Tf)].$$

При длительности импульса, меньшей мертвого времени счетчика, за время импульса излучения возможно не более одного срабатывания счетчика, и максимальная частота его

срабатываний становится равна частоте следования импульсов излучения. Будем рассматривать ситуацию, при которой длительность импульса излучения меньше мертвого времени используемого дозиметра со счетчиком Гейгера–Мюллера, а промежуток между импульсами больше времени его полного восстановления. Это справедливо для импульсов длительностью менее 50 мкс при частоте следования до 2000 Гц. При этих условиях за время одного импульса излучения счетчик Гейгера–Мюллера может сработать не более одного раза независимо от мощности дозы, а за время между импульсами успеет полностью восстановить рабочее состояние.

Чувствительность используемого ГМД можно охарактеризовать количеством срабатываний счетчика на единицу дозы излучения  $K$ . Параметры контролируемого поля импульсного излучения можно охарактеризовать длительностью импульса излучения  $T$ , частотой следования импульсов излучения  $f$  и средней мощностью дозы излучения  $\dot{H}$ .

Доза за один импульс излучения при этом равна:

$$H_1 = \dot{H} / f,$$

а мощность дозы в импульсе

$$\dot{H}_1 = H_1 / T = \dot{H} / (Tf).$$

Вероятность одного срабатывания счетчика Гейгера–Мюллера при воздействии одного импульса излучения источника равна:

$$P_1 = KH_1 = K\dot{H} / f.$$

Частота срабатываний счетчика Гейгера–Мюллера

$$N = P_1 f = K\dot{H}.$$

Для аналогичного "гипотетического" счетчика с нулевым мертвым временем возможны и несколько срабатываний счетчика за один импульс излучения. Вероятность первого срабатывания счетчика за импульс ИТИ в момент времени  $t$  в диапазоне  $dt$  равна  $KH_1 dt$ , а второго срабатывания в том же импульсе излучения составляет  $K\dot{H}_1 (T - t)$ .

Вероятность двух срабатываний "гипотети-

ческого" счетчика за один импульс излучения в этом случае составит:

$$P_2 = \frac{K^2 \dot{H}^2}{2f^2},$$

а вероятность одного или двух срабатываний:

$$P_{12} = P_1 + P_2 = \frac{K\dot{H}}{f} + \frac{K^2 \dot{H}^2}{2f^2} = \frac{K\dot{H}}{f} \left( 1 + \frac{K\dot{H}}{2f} \right).$$

Количество срабатываний счетчика в единицу времени составит:

$$N_{12} = \frac{K\dot{H}}{f} \left( 1 + \frac{K\dot{H}}{2f} \right) = N \left( 1 + \frac{K\dot{H}}{2f} \right).$$

При этом средняя частота срабатываний счетчика, которая определяет измеряемую величину МАД, возрастает в  $\left( 1 + \frac{K\dot{H}}{2f} \right) = (1 + \alpha \dot{H})$  раз, где  $\alpha = \frac{K}{2f}$ .

Автором предлагается использовать этот коэффициент для корректировки результатов измерений с целью частичного учета наличия мертвого времени реального счетчика Гейгера–Мюллера.

Скорректированное значение МАД ИТИ  $\dot{H}_{\text{кор}}$  выражается через измеренное  $\dot{H}_{\text{изм}}$  следующим образом:

$$\dot{H}_{\text{кор}} = \dot{H}_{\text{изм}} / (1 - \alpha \dot{H}_{\text{изм}}).$$

Для  $\dot{H}_{\text{кор}}$  и  $\dot{H}_{\text{изм}}$ , выраженных в микрозивертах в час, получаем следующее выражение:

$$\begin{aligned} \dot{H}_{\text{кор}} &= \dot{H}_{\text{изм}} / \left[ 1 - (\alpha / 3.6) \dot{H}_{\text{изм}} \right] = \\ &= \dot{H}_{\text{изм}} / (1 - \alpha_1 \dot{H}_{\text{изм}}), \end{aligned}$$

где  $\alpha_1 = \alpha / 3.6 = K / (7.2f)$ .

Параметр  $K$  можно получить по результатам измерения значения "плато"  $\dot{H}_n$  в зависимости измеренной МАД от МАД источника излучения, соответствующего области, в которой показания дозиметра не изменяются при дальнейшем росте МАД источника. В этом случае счетчик дозиметра срабатывает при каждом импульсе излучения источника, и ча-

стота срабатываний счетчика равна частоте следования импульсов излучения  $f$ . При этом  $K = f / \dot{H}_n = 3.6 f / \dot{H}_n$  и  $\alpha_1 = 1 / (2 \dot{H}_n)$ .

Скорректированное измеренное значение мощности дозы

$$\dot{H}_{\text{кор}} = \dot{H}_{\text{изм}} / \left[ 1 - \dot{H}_{\text{изм}} / (2 \dot{H}_n) \right].$$

Для вычисления поправочного коэффициента достаточно получить значение "плато" для данного дозиметра и данного источника излучения.

Полученное выражение учитывает только возможность двойных срабатываний "гипотетического" счетчика с нулевым мертвым временем за один импульс излучения. Но в этом

случае возможно и большее число срабатываний. Анализ полученных результатов позволил вывести эмпирическое соотношение, учитывающее возможность нескольких срабатываний "гипотетического" счетчика с нулевым мертвым временем за один импульс, при котором скорректированные результаты измерений близки к показаниям образцового дозиметра для максимальной области мощностей доз. Данное соотношение имеет вид

$$\dot{H}_{\text{кор}} = \dot{H}_{\text{изм}} / \left( 1 - 0.7 \dot{H}_{\text{изм}} / \dot{H}_n \right). \quad (1)$$

**Результаты.** На рис. 1–7 представлены экспериментальные данные. Приведены ре-

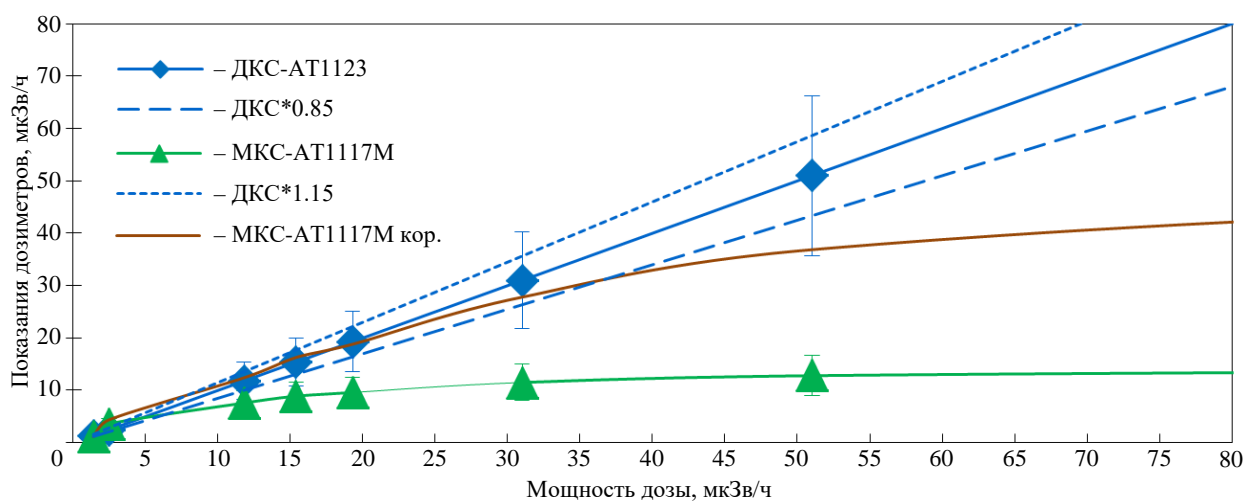


Рис. 1. Результаты измерения дозиметрами ДКС и МКС МАД ИТИ при частоте следования импульсов излучения 50 Гц  
Fig. 1. Bremsstrahlung doses at a pulsed frequency of 50 Hz measured by the DKS and MKS dosimeters

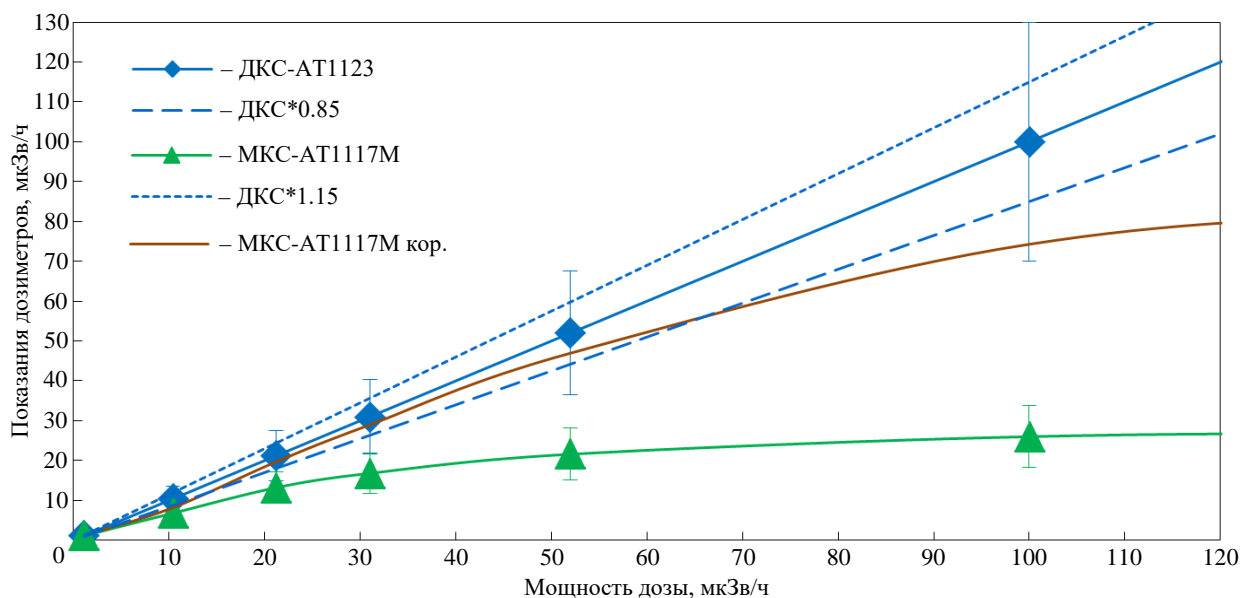


Рис. 2. Результаты измерения дозиметрами ДКС и МКС МАД ИТИ при частоте следования импульсов излучения 100 Гц  
Fig. 2. Bremsstrahlung doses at a pulsed frequency of 100 Hz measured by the DKS and MKS dosimeters

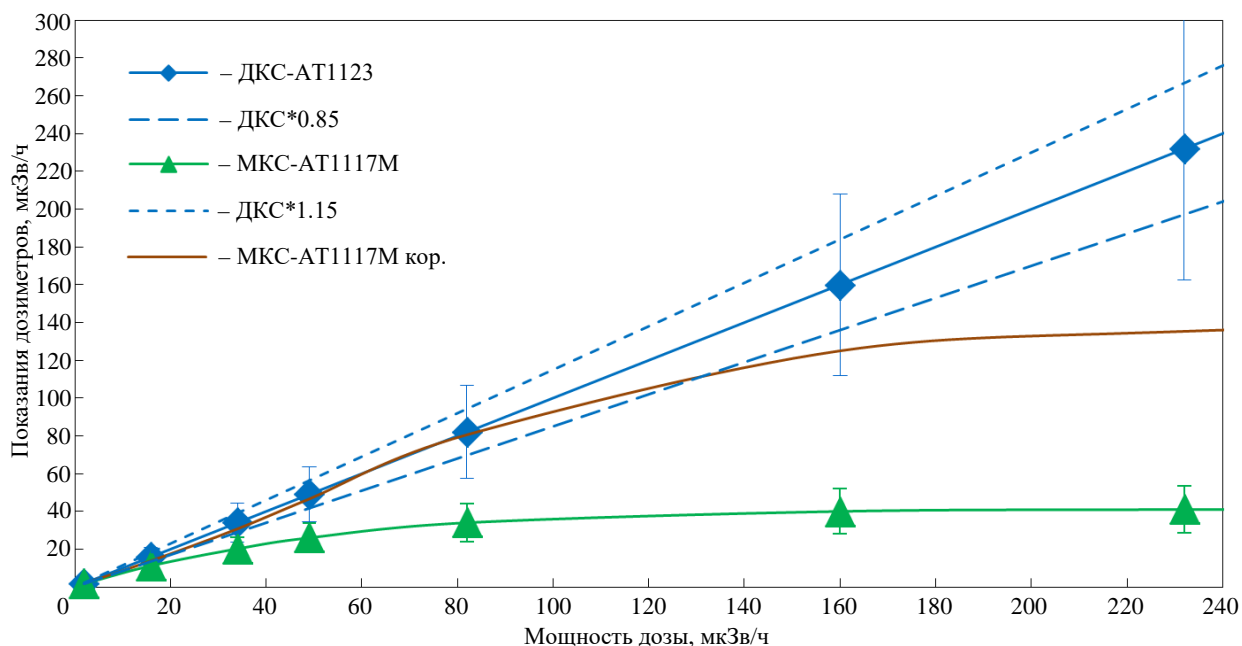


Рис. 3. Результаты измерения дозиметрами ДКС и МКС МАД ИТИ при частоте следования импульсов излучения 150 Гц

Fig. 3. Bremsstrahlung doses at a pulsed frequency of 150 Hz measured by the DKS and MKS dosimeters

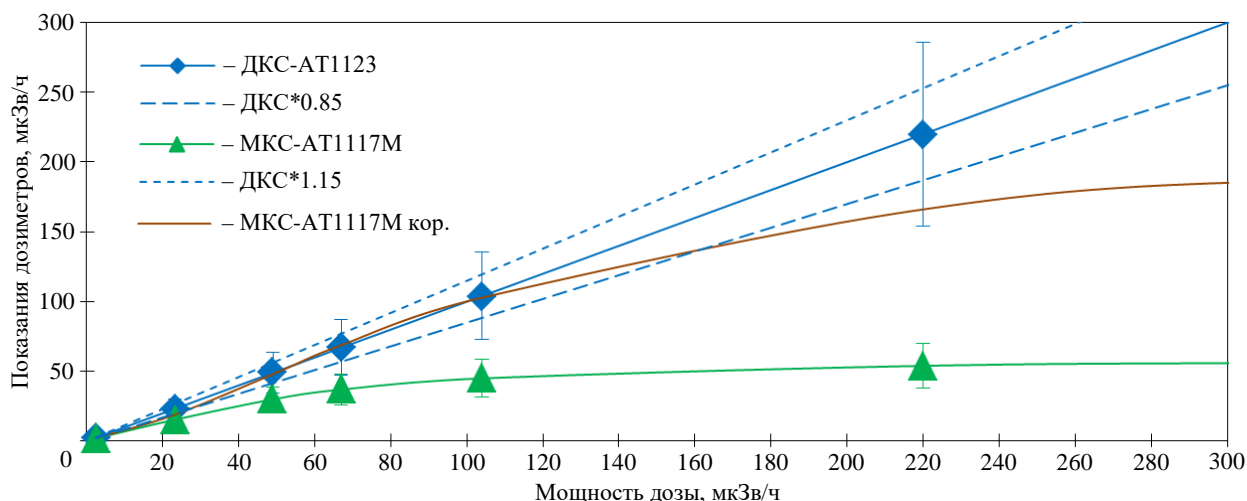


Рис. 4. Результаты измерения дозиметрами ДКС и МКС МАД ИТИ при частоте следования импульсов излучения 200 Гц

Fig. 4. Bremsstrahlung doses at a pulsed frequency of 200 Hz measured by the DKS and MKS dosimeters

зультаты измерений дозиметром ДКС, принятым за образцовый (синие кривые), результаты измерений в тех же условиях дозиметром МКС (зеленые кривые) и скорректированные с использованием выражения (1) результаты измерений данным дозиметром (коричневые кривые). Штриховыми линиями на рисунках обозначена область  $\pm 15\%$  отклонения от показаний дозиметра ДКС.

Как видно из рисунков, предложенная методика корректировки результатов измерений МАД ИТИ с использованием ГМД позволяет существенно расширить диапазон измерения с погрешностью менее 15 %. В таблице приведе-

ны полученные в результате анализа результатов измерений значения "плато"  $\dot{H}_n$  и максимальные значения измеряемой с дополнительной погрешностью менее 15 % МАД  $\dot{H}_{\max}$  в зависимости от частоты следования импульсов источника тормозного излучения.

**Обсуждение.** Как видно из представленных результатов, при использовании предложенной методики корректировки результатов измерений максимальная МАД ИТИ с максимальной энергией 3.0 МэВ, которая может быть измерена дозиметром МКС с дополнительной по-

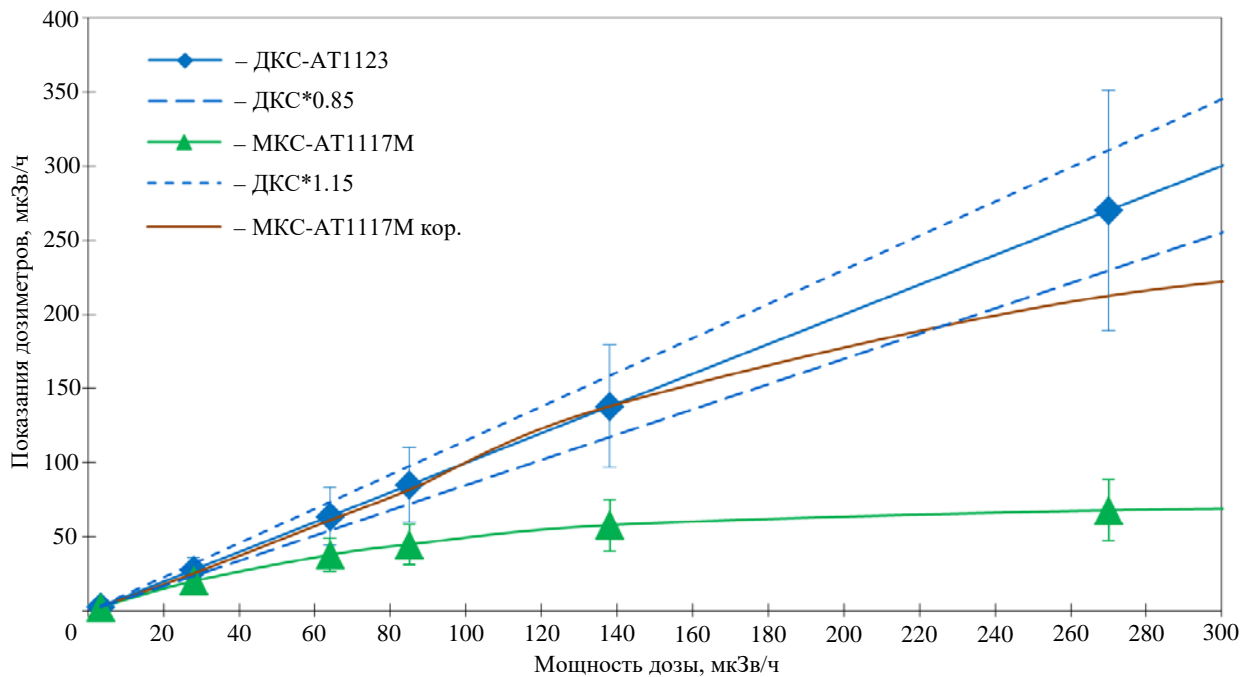


Рис. 5. Результаты измерения дозиметрами ДКС и МКС МАД ИТИ при частоте следования импульсов излучения 250 Гц

Fig. 5. Bremsstrahlung doses at a pulsed frequency of 250 Hz measured by the DKS and MKS dosimeters

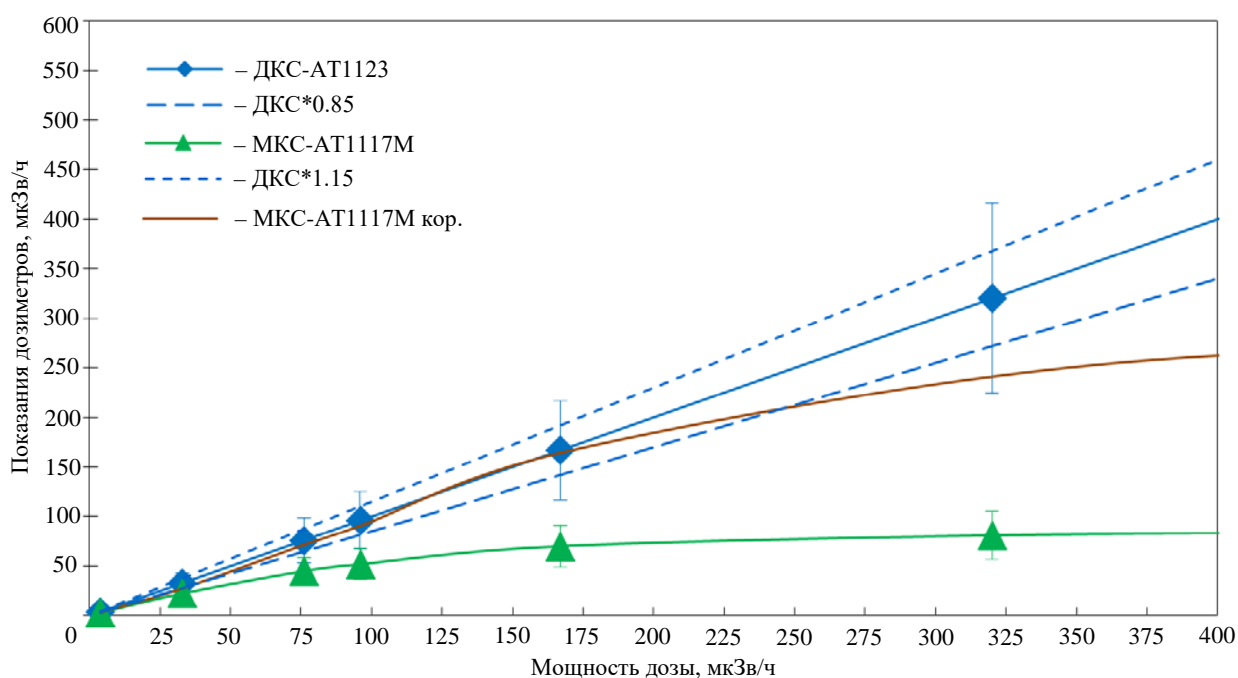


Рис. 6. Результаты измерения дозиметрами ДКС и МКС МАД ИТИ при частоте следования импульсов излучения 300 Гц

Fig. 6. Bremsstrahlung doses at a pulsed frequency of 300 Hz measured by the DKS and MKS dosimeters

грешностью не более 15 %, не менее, чем в 2.5 раза превышает значение "плато", т. е. значение максимальных показаний данного дозиметра. При выходе на "плато" показаний дозиметра кривая скорректированных показаний также выходит на "плато", но достигаемое при этом значение МАД в 3.3 раза больше.

Значения максимальной частоты срабатываний счетчика, а следовательно, и максимальных возможных показаний дозиметра ("плато") линейно зависят от отношения  $f/K$ . Достаточно надежной характеристикой ГМД, определяющей его характеристики при проведении дозиметрии импульсных излучений, является значение



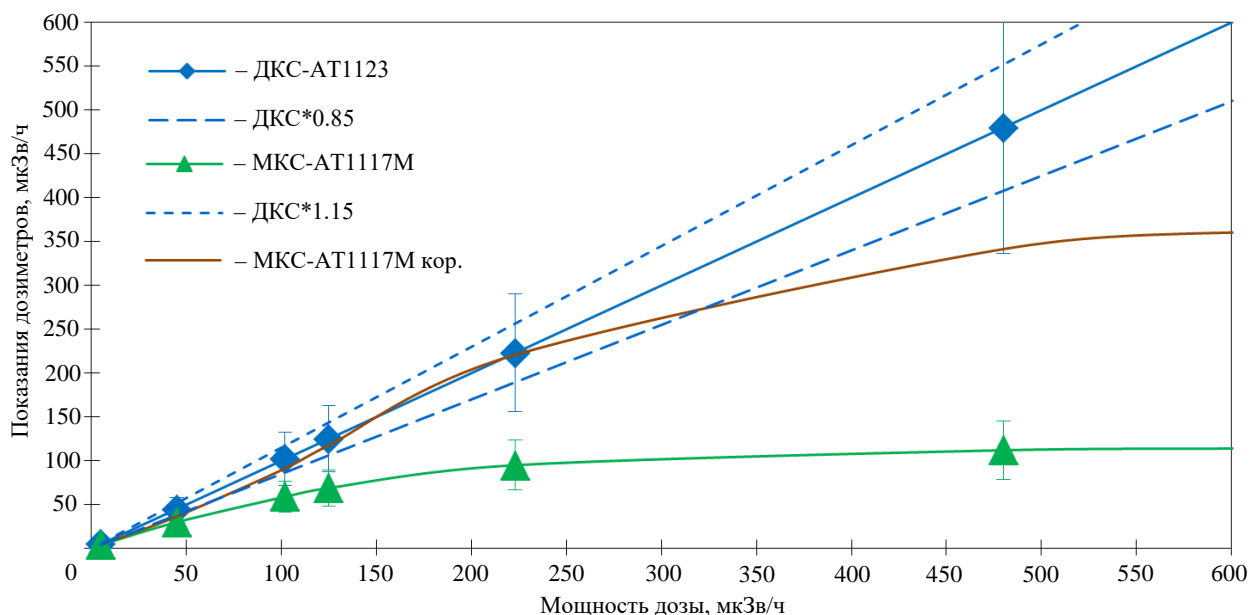


Рис. 7. Результаты измерения дозиметрами ДКС и МКС МАД ИТИ при частоте следования импульсов излучения 400 Гц  
Fig. 7. Bremsstrahlung doses at a pulsed frequency of 400 Hz measured by the DKS and MKS dosimeters

Значения "плато" и максимальные значения измеряемой с дополнительной погрешностью менее 15 % МАД  
в зависимости от частоты следования импульсов источника

The values of the plateau and maximum values of the dose rate measured with an additional error  
of less than 15 % depending on the pulse repetition frequency of the source

$f$ , Гц	$\dot{H}_n$ , мкЗв/ч	$\dot{H}_{\max}$ , мкЗв/ч	$\dot{H}_{\max}/\dot{H}_n$
50	13.7	35	2.6
100	27	67	2.5
150	42	130	3.1
200	56	160	2.9
250	70	220	3.1
300	86	250	2.9
400	115	320	2.8

"плато", полученное для данного дозиметра при проведении измерений на данном источнике.

Методика проведения измерений МАД ИТИ при длительностях импульсов источника излучения не более 50 мкс и частоте их следования по крайней мере до 400 Гц с использованием ГМД может быть представлена следующим образом:

1. Проводят измерения данным дозиметром МАД контролируемого источника до получения неизменного измеренного значения при росте мощности дозы от источника излучения. Это

максимальное значение "плато", при котором каждому импульсу излучения соответствует срабатывание счетчика дозиметра  $\dot{H}_n$ .

2. Определяют максимальное значение МАД, которое может быть получено с дополнительной погрешностью не более 15 % с использованием данного дозиметра, равное  $2.5\dot{H}_n$ .

3. При проведении измерений каждое измеренное значение МАД  $\dot{H}_{\text{изм}}$  корректируют с использованием соотношения

$$\dot{H}_{\text{кор}} = \dot{H}_{\text{изм}} / (1 - 0.7 \dot{H}_{\text{изм}} / \dot{H}_n).$$

4. Скорректированное значение МАД  $\dot{H}_{\text{кор}}$  считают результатом измерений, если оно не превышает  $2.5\dot{H}_n$ .

5. Если  $\dot{H}_{\text{кор}}$  превышает  $2.5\dot{H}_n$ , для проведения измерений необходимо использовать

другой дозиметр, например ГМД с меньшей чувствительностью.

Таким образом, проведенное исследование подтверждает целесообразность и возможность успешного использования ГМД для дозиметрии ИТИ с помощью предложенной методики измерений с ограничением по максимально измеряемой МАД.

### Список литературы

1. Радиационная безопасность в лучевой терапии с использованием ускорителей электронов / К. Нурлыбаев, Ю. Н. Мартынюк, А. И. Каракаш, Л. Л. Синников, Е. Н. Лыкова, А. Г. Цовьянов, С. И. Иванов, С. В. Логинова // АНРИ. 2014. Т. 76, № 1. С. 15–21.
2. Снижение дозовой нагрузки на пациента при проведении диагностики с помощью цифровых импульсных наносекундных рентгеновских комплексов / В. А. Бессонова, П. В. Гаврилов, А. А. Комарский, С. Р. Корженевский, А. С. Чепусов // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2016. Т. 61, № 2. С. 53–57.
3. Мартынюк Ю. Н., Нурлыбаев К., Ревков А. А. Дозиметрия импульсного излучения // АНРИ. 2018. Т. 92, № 1. С. 2–11.
4. Состояние и пути развития импульсной дозиметрии ускорительных моделирующих установок / В. Н. Улимов, С. Ю. Ноздрачев, В. Н. Синев, В. В. Казаков, Н. И. Терентьев // Вопр. атомной науки и техники. Сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2011. № 1. С. 70–74.
5. Ambrosi P., Borowski M., Iwatschenko M. Considerations Concerning the Use of Counting Active Personal Dosimeters in Pulsed Fields of Ionising Radiation // Radiation Protection Dosimetry. 2010. Vol. 139, iss. 4. P. 483–493. doi: 10.1093/rpd/ncp286
6. Мартынюк Ю. Н. Государственный реестр средств измерений. Ч. 2: Дозиметры общего назначения, импульсные и специальные // АНРИ. 2020. № 4 (103). С. 3–13. doi: 10.37414/2075-1338-2020-102-3-3-13
7. Гинзбург Д. Ионизационная камера для измерений в полях импульсного фотонного излучения // АНРИ. 2017. № 2 (89). С. 18–24.
8. International standard. Radiation protection instrumentation - Installed dose rate meters, warning assemblies and monitors – X- and gamma-radiation of energy between 50 keV and 7 MeV. IEC 60532. Ed. 3.0. 2010. 84 p.
9. Harty P. D., Ramanathan G. Response of Active Electronic Radiation Monitors in Pulsed X-ray Beams from Linacs. URL: <https://www.arpsconference.com.au/2013/wp-content/uploads/2013/11/1550-Peter-Harty.pdf> (дата обращения 10.05.2024).
10. Determination of relevant parameters for the use of electronic dosimeters in pulsed fields of ionizing radiation / H. Zutz, O. Hupe, P. Ambrosi, J. Klammer // Radiation Protection Dosimetry. 2012. Vol. 151, iss. 3. P. 403–410. doi: 10.1093/rpd/ncs027
11. The Dosimetry of Pulsed Radiation / J. W. Boag, E. Epp, E. M. Fielden, R. P. Parker // ICRU. 1982. Report № 34. 47 p.
12. Technical specification. Radiological protection instrumentation – electronic counting dosimeters of ionizing radiation. IEC/TS 62743. Ed.1. 2012. 25 p.
13. Ankerhold U., Hupe O., Ambrosi P. Deficiencies of Active Electronic Radiation Protection Dosimeters in Pulsed Fields // Radiation Protection Dosimetry. 2009. Vol. 135, № 3. P. 149–153. doi: 10.1093/rpd/ncp099
14. Frederich S., Hupe O. Pulsed Radiation Facility with About 115 ns Pulse Durations Characterisation and Quality Assurance // IAEA-CN-223: Intern. Conf. on Occupational Radiation Protection: Enhancing the Protection of Workers – Gaps, Challenges and Developments, Vienna, Austria, 1–5 Dec. 2014. P. 112–116.
15. Hupe O., Frederich S., Zutz H. Type Test Requirements and Refererens Fields for Radiation Protection Dosimetry in Pulsed Radiation Fields // IAEA-CN-223: Intern. Conf. on Occupational Radiation Protection: Enhancing the Protection of Workers – Gaps, Challenges and Developments, Vienna, Austria, 1–5 Dec. 2014. P. 117–121.
16. 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
17. Барковский А. Н., Воробьев Б. Ф., Титов Н. В. Особенности радиационного контроля переносных импульсных рентгеновских дефектоскопов / под ред. А. Ю. Поповой // Актуальные вопр. организации радиационного контроля и надзора за физическими факторами: материалы Всерос. науч.-практ. конф. 2017. С. 30–32.
18. Климанов В. А., Крамер-Агеев Е. А., Смирнов В. В. Радиационная дозиметрия / под ред. В. А. Климанова. М.: НИЯУ МИФИ, 2014. 648 с.

### Информация об авторе

Титов Николай Владимирович – младший научный сотрудник лаборатории внешнего облучения Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены им. профессора П. В. Рамзае-

ва. Автор 18 научных работ. Сфера научных интересов – радиационная безопасность; совершенствование методов радиационного контроля.

Адрес: Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены им. профессора П. В. Рамзаева, ул. Мира, д. 8, Санкт-Петербург, 197101, Россия

E-mail: [pustoshka@inbox.ru](mailto:pustoshka@inbox.ru)

<https://orcid.org/0009-0003-9920-0394>

## References

1. Nurlybaev K., Martynyuk Yu. N., Karakash A. I., Sinnikov L. L., Lykova E. N., Tsov'yanov A. G., Ivanov S. I., Loginova S. V. Radiation Protection in Radiotherapy Using Electron Accelerators. ANRI. 2014, vol. 76, no. 1, pp. 15–21. (In Russ.)
2. Bessonova V. A., Gavrilov P. V., Komarsky A. A., Korzhenevsky S. R., Chepusov A. S. Reduction of Patient Radiation Dose During Diagnostics with the Digital Pulsed Nanosecond X-ray Systems. Medical Radiology and Radiation Safety. 2016, vol. 61, no. 2, pp. 53–57. (In Russ.)
3. Martynyuk Yu. N., Nurlybaev K., Revkov A. A. Dosimetry of Pulsed Radiation. ANRI. 2018, vol. 92, no. 1, pp. 2–11. (In Russ.)
4. Ulimov V. N., Nozdrachev S. Yu., Sinev V. N., Kazakov V. V., Terentyev N. I. The State and Ways of Development of Pulse Dosimetry of Accelerator Modeling Installations. Questions of Atomic Science and Technics. Ser.: Physics of Radiation Effects on Radio-Electronic Equipment. 2011, no. 1, pp. 70–74. (In Russ.)
5. Ambrosi P., Borowski M., Iwatschenko M., Considerations Concerning the Use of Counting Active Personal Dosimeters in Pulsed Fields of Ionising Radiation. Radiation Protection Dosimetry. 2010, vol. 139, iss. 4, pp. 483–493. doi: 10.1093/rpd/ncp286
6. Martynyuk Yu. N. The State Fund of Metrology of Russian Federation. Pt 2. General-Purpose, Pulse and Special Dosimeters. ANRI. 2020, no. 4 (103), pp. 3–13. doi: 10.37414/2075-1338-2020-102-3-3-13 (In Russ.)
7. Ginzburg D. Ionisation Chamber for Measurement of Pulsed Photon Radiation Fields. ANRI. 2017, no. 2 (89), pp. 18–24. (In Russ.)
8. International Standard. Radiation Protection Instrumentation - Installed Dose Rate Meters, Warning Assemblies and Monitors – X- and Gamma-Radiation of Energy Between 50 keV and 7 MeV. IEC 60532. Ed. 3.0. 2010. 84 p.
9. Harty P. D., Ramanathan G. Response of Active Electronic Radiation Monitors in Pulsed X-ray Beams from Linacs. Available at: <https://www.arpconference.com.au/2013/wp-content/uploads/2013/11/1550-Peter-Harty.pdf> (accessed 10.05.2024).
10. Zutz H., Hupe O., Ambrosi P., Klammer J. Determination of Relevant Parameters for the Use of Electronic Dosimeters in Pulsed Fields of Ionizing Radiation. Radiation Protection Dosimetry. 2012, vol. 151, iss. 3, pp. 403–410. doi: 10.1093/rpd/ncs027
11. Boag J. W., Epp E., Fielden E. M., Parker R. P. The Dosimetry of Pulsed Radiation. ICRU. 1982, report no. 34, 47 p.
12. Technical specification. Radiological Protection Instrumentation – Electronic Counting Dosimeters of Ionizing Radiation. IEC/TS 62743. Ed.1. 2012, 25 p.
13. Ankerhold U., Hupe O., Ambrosi P. Deficiencies of Active Electronic Radiation Protection Dosimeters in Pulsed Fields. Radiation Protection Dosimetry. 2009, vol. 135, no. 3, pp. 149–153. doi: 10.1093/rpd/ncp099
14. Frederich S., Hupe O. Pulsed Radiation Facility with About 115 ns Pulse Durations Characterisation and Quality Assurance. IAEA-CN-223: Intern. Conf. on Occupational Radiation Protection: Enhancing the Protection of Workers – Gaps, Challenges and Developments, Vienna, Austria, 1–5 Dec. 2014, pp. 112–116.
15. Hupe O., Frederich S., Zutz H. Type Test Requirements and Refererens Fields for Radiation Protection Dosimetry in Pulsed Radiation Fields. IAEA-CN-223: Intern. Conf. on Occupational Radiation Protection: Enhancing the Protection of Workers – Gaps, Challenges and Developments, Vienna, Austria, 1–5 Dec. 2014, pp. 117–121.
16. Titov N. V. Prospects for the Use of the Dosimeters with Geiger–Muller Counters for the Dosimetry of the Pulse Emission. Radiation Hygiene. 2019, vol. 12, no. 2, pp. 76–80. doi: 10.21514/1998-426X-2019-12-2-76-80
17. Barkovsky A. N., Vorobyov B. F., Titov N. V. Features of radiation monitoring of portable pulsed X-ray flaw detectors. In the collection: Topical issues of the organization of radiation control and supervision of physical factors. Ed. by A.Y. Popova. Proc. of the All-Russ. Scientific and Practical Conf. 2017, pp. 30–32. (In Russ.)
18. Klimanov V. A., Kramer-Ageev E. A., Smirnov V. V. Radiation Dosimetry. Ed. by V. A. Klimanov. Moscow, NRU MEPhI, 2014, 648 p. (In Russ.)

## Information about the author

**Nikolay V. Titov**, junior researcher at the Laboratory of External Irradiation of St. Petersburg Scientific Research Institute of Radiation Hygiene n. a. Professor P. V. Ramzaev. The author of 18 scientific publications. Area of expertise: radiation safety; improvement of radiation control methods.

Address: St Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene n. a. Professor P. V. Ramzaev, 8, Mira St., St Petersburg 197101, Russia

E-mail: [pustoshka@inbox.ru](mailto:pustoshka@inbox.ru)

<https://orcid.org/0009-0003-9920-0394>