

# Испытания алгоритма автоматического определения импульсного излучения в дозиметре ДКС-АТ1123

Данная публикация является продолжением цикла статей, посвященных оценке работоспособности дозиметрического оборудования в полях импульсного фотонного излучения. В ней рассматривается работа алгоритма автоматического определения импульсного характера поля фотонного излучения. Данный алгоритм позволяет определять характер поля излучения и осуществлять переключение дозиметрического оборудования в требуемый режим при измерениях мощности амбиентного эквивалента дозы  $\dot{H}^*(10)$  в импульсных или непрерывных полях. Корректность работы алгоритма проверена путем его практической реализации в опытном образце модернизированной версии дозиметра ДКС-АТ1123 с последующими измерениями, выполненными в полях нано-, микро- и миллисекундного импульсного излучения с известными дозиметрическими и временными характеристиками. Показано, что дозиметр ДКС-АТ1123 при реализации в нем такого алгоритма позволяет автоматически определять импульсный характер поля фотонного излучения и корректно переключаться в необходимый режим работы при измерениях мощности амбиентного эквивалента дозы  $\dot{H}^*(10)$ . Реализация данного алгоритма в дозиметре ДКС-АТ1123, а также иные улучшения технических характеристик планируются в ходе его модернизации.

**И.А.Алексейчук,  
А.А.Загороднюк, С.В.Лазаренко,  
М.В.Масюкович, А.Н.Новик,  
В.И.Петров, А.Ю.Тараев**

Научно-производственное унитарное предприятие  
«АТОМТЕХ», г. Минск, Республика Беларусь

**Ключевые слова:** линейный ускоритель электронов, ангиограф, импульсное фотонное излучение, дозиметрическое оборудование, автоматическое определение импульсного излучения.

Ранее в цикле публикаций [1-4] была произведена оценка работоспособности дозиметра ДКС-АТ1123 при проведении измерений в полях импульсного фотонного излучения. Было показано, что дозиметр ДКС-АТ1123 способен работать в полях импульсного микросекундного фотонного излучения, генерируемого линейными ускорителями электронов. Дозиметр корректно измеряет среднюю мощность амбиентного эквивалента дозы  $\dot{H}^*(10)$  (далее – СМАЭД) при условии, что мощность амбиентного эквивалента дозы  $\dot{H}^*(10)$  в единичном импульсе (далее – МАЭД в импульсе) не превышает значения равного 0,5 Зв/с [4]. Измерения, описанные в статьях [1-4], выполнялись в лабораторных условиях, когда оператору были известны все основные временные, дозиметрические и энергетические характеристики поля импульсного излучения. Однако на практике оператору заранее не всегда известно, в поле какого излучения (импульсного или непрерывного) он производит измерения.

Для получения правильных результатов измерений мощности дозы знание характера излучения имеет принципиальное значение [5,6]. Поэтому для корректного измерения

СМАЭД в дозиметре необходимо реализовать приборный алгоритм, позволяющий определять характер фотонного излучения (импульсное или непрерывное) и перевести дозиметр в подходящий режим работы.

Предприятием «АТОМТЕХ» был разработан алгоритм, позволяющий автоматически определять характер поля излучения (непрерывное или импульсное излучение) с последующим переключением дозиметра в соответствующий режим работы.

Целью настоящей работы является проверка работоспособности данного алгоритма. Корректность работы алгоритма была проверена путем его реализации в экспериментальном образце модернизированной версии дозиметра ДКС-АТ1123 [7] с последующей апробацией путем прямых измерений в полях непрерывного фотонного излучения (гамма-излучение – установки УДГ-АТ110 [8] и УДГ-АТ130 [9] с радионуклидами  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ; рентгеновское излучение – установка поверочная рентгеновского непрерывного излучения УПР-АТ300 [10]) и импульсного фотонного излучения милли-, микро- и наносекундного диапазона (источники излучения – медицинский ангиограф *Toshiba Infx 8000v* для миллисекундного излучения, медицинский линейный ускоритель электронов *Elekta Infinity* [11] для микросекундного излучения и экспериментальная установка импульсного наносекундного рентгеновского излучения УДР-АТ250 на основе аппарата рентгеновского излучения Памир-250).



**Рис.1.** Испытания экспериментального образца модернизированной версии дозиметра ДКС-АТ1123 с улучшенным алгоритмом в полях непрерывного гамма-излучения, создаваемых на установке УДГ-АТ130.

**Проверка работоспособности экспериментального образца модернизированной версии дозиметра ДКС-АТ1123 с алгоритмом автоматического определения характера излучения в полях непрерывного излучения**

Для создания полей непрерывного фотонного излучения использовались следующие источники:

- установка дозиметрическая гамма-излучения УДГ-АТ110 [8] с набором источников <sup>137</sup>Cs, <sup>241</sup>Am, <sup>60</sup>Co;
- установка дозиметрическая гамма-излучения эталонная 1-го разряда УДГ-АТ130 [9] с набором источников <sup>137</sup>Cs;
- установка поверочная рентгеновского излучения УПР-АТ300 [10].

Для примера схема испытаний прибора на дозиметрической установке непрерывного излучения УДГ-АТ130 представлена на рис. 1. При измерениях в полях непрерывного излучения дозиметр включен в режим автоматического определения импульсного излучения. При измерениях контролировалась СМАЭД и установившийся режим измерений. Результаты испытаний приведены в табл. 1, 2.

**Табл. 1.** Результаты испытаний работы экспериментального образца модернизированной версии дозиметра ДКС-АТ1123 в полях непрерывного гамма-излучения, создаваемого на установках УДГ-АТ110 и УДГ-АТ130.

Контрольная точка, мкЗв/ч	Нуклид	Установившийся режим измерений	СМАЭД (измерения) $\dot{H}^*(10)$ , мкЗв/ч
20	<sup>241</sup> Am	Непрерывный	19,8
200			197
20	<sup>60</sup> Co		21,5
200			220
70	<sup>137</sup> Cs		69,9
700			699
7000			7010
70000			69900
700000			703000
7000000			6980000

Из анализа результатов испытаний следует, что при облучении в поле непрерывного фотонного излучения дозиметр корректно определяет тип излучения при различных значениях СМАЭД и качествах излучения. Значения СМАЭД, измеренные дозиметром, согласуются с паспортными значениями СМАЭД, генерируемыми установками в точке измерения. Расхождение между паспортными и измеренными значениями СМАЭД находится в пределах погрешности дозиметра с учетом его энергетической зависимости.

**Проверка работоспособности экспериментального образца модернизированной версии дозиметра ДКС-АТ1123 с алгоритмом автоматического определения характера излучения в полях импульсного излучения**

Для создания полей импульсного излучения применялись:

- экспериментальная установка дозиметрическая импульсного наносекундного рентгеновского излучения УДР-АТ250 (далее – УДР-250);
- линейный ускоритель электронов Elekta Infinity (далее – ЛУЭ), генерирующий микросекундное импульсное фотонное излучение;
- медицинский ангиограф Toshiba Infx-8000v (далее – ангиограф) для миллисекундного излучения.

Проверка воспроизводимости измерений проводилась согласно схеме [4]. Для случая измерений в поле импульсного излучения, генерируемого ЛУЭ, контролировался установившийся режим измерений дозиметра. Значения СМАЭД, измеренные дозиметром, сравнивались с опорными величинами, генерируемыми ЛУЭ в точке измерения. Под опорной величиной понимается значение СМАЭД в заданной точке, полученное путем пересчета мощности кермы согласно методике, детально описанной в работах [1-4].

**Табл.2.** Результаты испытаний экспериментального образца модернизированной версии дозиметра ДКС-АТ1123 в полях непрерывного рентгеновского излучения, создаваемого на установке УПР-АТ300.

Контрольная точка, мкЗв/ч	Качество излучения	Установившийся режим измерений	СМАЭД (измерения) $\dot{H}^*(10)$ , мкЗв/ч
190,8	N100 (средняя энергия излучения – 87,9 кэВ)	Непрерывный	170,33
678,2			600
970,6			860
1460			1300
6712			6200
23930			22000
192300			184000
178,3	N300 (средняя энергия излучения – 254 кэВ)		164,67
738,3			643
1037			930
1531			1380
8077			7400
25450			23300
195300			179000

Для случая измерений в полях импульсного излучения, генерируемых УДР-250 и ангиографом, контролировался установившийся режим работы дозиметра. Показания дозиметра при измерениях в данных полях приводятся справочно ввиду отсутствия методики, позволяющей пересчитать мощность кермы, генерируемой УДР-250 и ангиографом в опорную величину (СМАЭД).

Схема испытаний на дозиметрической установке импульсного наносекундного рентгеновского излучения УДР-АТ250 представлена

**Табл.3.** Результаты испытаний экспериментального образца модернизированной версии дозиметра ДКС-АТ1123 в полях импульсного наносекундного рентгеновского излучения, создаваемого на установке УДР-АТ250.

Позиция точки измерения	Установившийся режим измерений дозиметра	СМАЭД (измерения) $\dot{H}^*(10)$ , мкЗв/ч
Позиция 1	Импульсный	23
Позиция 2	Импульсный	79
Позиция 3	Импульсный	490

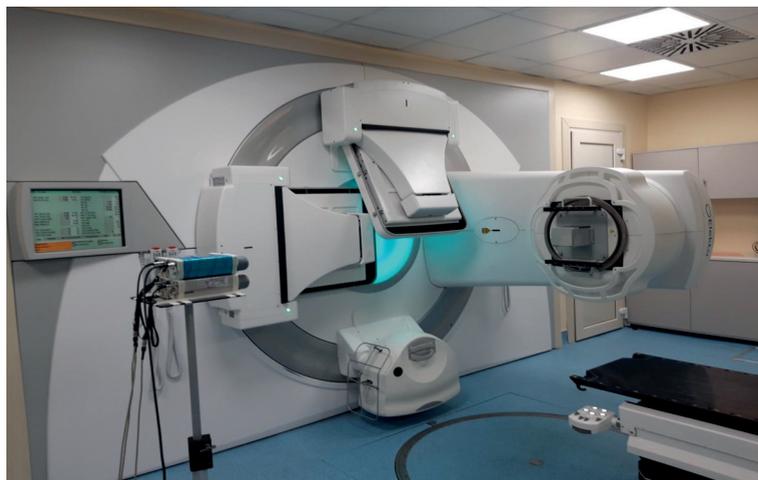


**Рис.2.** Испытания экспериментального образца модернизированной версии дозиметра ДКС-АТ1123 в полях импульсного наносекундного рентгеновского излучения, создаваемого на установке УДР-АТ250.

на рис.2. Основные характеристики установки: амплитуда напряжения на рентгеновской трубке 250 кВ, длительность единичного импульса 10 нс, частота повторения импульсов 10 Гц. При испытаниях устанавливалось время экспозиции, равное 30 сек. Мощность дозы в точке измерения варьировалась путем изменения заданного расстояния от излучателя до точки измерения (позиция 1, 2, 3). Результаты испытаний приведены в табл.3.

Схема испытаний на линейном ускорителе электронов аналогична схеме, детально описанной в работе [4], и представлена на рис.3. Испытания на ЛУЭ проводились со следующими параметрами излучения: ускоряющее напряжение первичного электронного пучка 6, 10 МВ; время экспозиции 30 сек. Длительность импульса составляет 2 мкс; частота повторения импульсов от 12 до 400 Гц [3]. Мощность дозы, выраженная в мониторных единицах (далее – МЕ), отпускаемых ЛУЭ в минуту, устанавливалась равной 40 и

**Рис.3.** Испытания экспериментального образца модернизированной версии дозиметра ДКС-АТ1123 в полях импульсно-микросекундного излучения, создаваемого на ЛУЭ Elekta Infinity.



640 МЕ. Под мощностью отпускаемой ЛУЭ дозы понимается выраженное в МЕ значение мощности дозы, генерируемое на выходе излучателя ЛУЭ и измеряемое встроенной в излучатель мониторинговой камерой. Под мониторинговой единицей понимается доза, поглощенная в расположенном на расстоянии 1 метр от излучателя ЛУЭ водном фантоме на глубине 10 см, равная 1 сГр [12]. Результаты измерений представлены в табл.4.

Ангиограф Toshiba Infx-8000v, на котором производились испытания экспериментального образца модернизированной версии дозиметра ДКС-АТ1123 в полях миллисекундного фотонного излучения, представлен на рис.4. Основные характеристики ангиографа: частота повторения импульсов 10 Гц, длительность единичного импульса 1, 2, 6 мс. Мощность дозы, создаваемая ангиографом в точке измерения, задавалась путем изменения тока в интервале от 10 до 100 мА и находилась

в интервале 9–700 мкЗв/ч. Схема испытаний дозиметра на ангиографе аналогична схеме испытаний на линейном ускорителе электронов. В ходе испытаний контролировался установившийся режим работы дозиметра. Результаты испытаний приведены в табл.5.

Результаты испытаний показывают, что во всех выше описанных схемах экспериментальный образец модернизированной версии дозиметра корректно определял характер излучения и автоматически переключался в необходимый режим измерений. Для случая измерения в полях, генерируемых ЛУЭ, показания дозиметра имеют хорошее совпадение с опорными величинами СМАЭД.

### Заключение

В статье приведены результаты испытаний экспериментального образца модернизированной версии дозиметра ДКС-АТ1123 с алгоритмом автоматического определения характера

**Табл.4.** Результаты испытаний экспериментального образца модернизированной версии дозиметра ДКС-АТ1123 в полях импульсного микросекундного излучения, создаваемого на ЛУЭ Elekta Infinity.

Опорная величина, мкЗв/ч	Режим ЛУЭ	Мощность дозы, МЕ/мин	Установившийся режим измерений дозиметра	СМАЭД (измерения) $\dot{H}^*(10)$ , мкЗв/ч
2000	6 МВ	40	Импульсный	2100
32000		640	Импульсный	33000
2310	10 МВ	40	Импульсный	2710
37000		640	Импульсный	39000



**Рис.4.** Ангиограф Toshiba Infx-8000v.

**Табл.5.** Результаты испытаний экспериментального образца модернизированной версии дозиметра ДКС-АТ1123 в полях импульсного миллисекундного излучения, создаваемого на медицинском ангиографе Toshiba Infx-8000v.

Длительность импульса, мс	Установившийся режим измерений дозиметра	СМАЭД (измерения) $\dot{H}^*(10)$ , мкЗв/ч
1	Импульсный	9,3
	Импульсный	106
2	Импульсный	18,5
	Импульсный	217
6	Импульсный	56
	Импульсный	650

излучения в полях непрерывного и импульсного фотонного излучения с известными дозиметрическими и временными характеристиками.

Прямые измерения показали, что дозиметр ДКС-АТ1123 с данным алгоритмом корректно определяет характер поля фотонного излучения и автоматически переключается в необходимый режим измерений.

При измерениях в фотонных полях непрерывного излучения, создаваемого поверочными дозиметрическими установками гамма- и рентгеновского излучения, дозиметр автоматически переключался в режим измерения

непрерывного излучения. Максимальное отклонение между показаниями дозиметра и паспортными значениями СМАЭД, генерируемыми установками непрерывного излучения в точке измерения, не превышало основной погрешности дозиметра в 15%.

При измерениях в фотонных полях импульсного нано-, микро- и миллисекундного излучения, создаваемого УДР-АТ250, ЛУЭ Elekta Infinity и ангиографом Toshiba Infx-8000v, соответственно, дозиметр автоматически переключался в режим измерения импульсного излучения. Для случая измерения в поле излучения ЛУЭ максимальное отклонение показаний, измеренных дозиметром СМАЭД, от опорных величин лежат в пределах основной погрешности дозиметра и не превышают 15%.

Для УДР-250 и ангиографа в настоящий момент отсутствует методика, позволяющая произвести корректный пересчет мощности кермы в СМАЭД. Поэтому в данной работе исследовалась работоспособность дозиметра при проведении измерений в полях излучения этих источников без привязки к опорным дозиметрическим величинам. В дальнейшем планируется разработка методик расчета опорных дозиметрических величин для данных источников излучения с проведением повторных исследований работоспособности модернизированной версии дозиметра ДКС-АТ1123.

Авторы публикации выражают глубокую благодарность директору предприятия «АТОМТЕХ», к.т.н. Кожемякину В.А. за полезные замечания и рекомендации при ее подготовке.

### Литература

1. Загороднюк А.А., Тараев А.Ю., Лазаренко С.В., Комар Д.И. Влияние свинцового фильтра на среднюю энергию фотонного излучения медицинского линейного ускорителя электронов // АНРИ. 2023. № 2(113). С. 13-24.
2. Загороднюк А.А., Тараев А.Ю., Лазаренко С.В. О возможности использования медицинских линейных ускорителей электронов в качестве поля эталонного импульсного фотонного излучения // Приборы и методы измерений. 2023. Т. 14, №3. С. 179-190.
3. Тараев А.Ю., Загороднюк А.А., Богдан М.А., Лазаренко С.В. Оценка характеристик полей фотонного излучения медицинских линейных ускорителей электронов различных производителей // АНРИ. 2023. № 4(115). С. 19-31.
4. Тараев А.Ю., Загороднюк А.А., Лазаренко С.В., Масюкович М.В. Оценка функционирования дозиметрического оборудования при проведении измерений в полях импульсного микросекундного фотонного излучения с известными характеристиками // АНРИ. 2024. № 2(117). С. 17-26.
5. R. Behrens, H. Zutz, J. Busse, «Spectrometry of pulsed photon radiation», *J. Radiol. Prot.*, vol. 42, no. 1, pp. 2-11, 2022.
6. Мартынюк Ю.Н., Нурлыбаев К., Ревков А.А. Дозиметрия импульсного излучения // АНРИ. 2018. № 1(92). С. 2-11 .
7. Дозиметр рентгеновского и гамма-излучения ДКС-АТ1123. URL: <https://atomtex.com/ru/dozimetry-rentgenovskogo-i-gamma-izlucheniya-dks-at1121-dks-at1123> (дата обращения: 9.06.2025).
8. Дозиметрическая установка гамма-излучения УДГ-АТ110. URL: <https://atomtex.com/ru/dozimetriceskaya-ustanovka-gamma-izlucheniya-udg-at110> (дата обращения: 9.06.2025).
9. Дозиметрическая установка гамма-излучения УДГ-АТ130. URL: <https://atomtex.com/ru/dozimetriceskaya-ustanovka-gamma-izlucheniya-udg-at130> (дата обращения: 9.06.2025).
10. Установка поверочная рентгеновского излучения УПР-АТ300 URL: <https://atomtex.com/ru/ustanovki-po-verochnye-rentgenovskogo-izlucheniya-upr-at300-upr-at3001-upr-at3002> (дата обращения: 9.06.2025).
11. Elekta Medical Linear Accelerator. Site Planning Construction Information. Elekta Limited, 2014, 112 p.
12. L.W. Brady, T.E. Yaeger. *Encyclopedia of Radiation Oncology*, Springer, 2013, 1015 p.

## Testing the Algorithm for Automatic Detection of Pulsed Radiation in the DKS-AT1123 Dosimeter

Alekseychuk Ivan, Zaharadniuk Aleksei, Lazarenko Sergey, Masukovich Maksim, Novik Aleksandr, Petrov Vitaly, Taraev Aleksandr (ATOMTEX SPE, Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** This publication is a continuation of the series of articles devoted to the assessment of performance of dosimetric equipment in the fields of pulsed photon radiation. It deals with the algorithm for automatic determination of the pulsed character of the photon radiation field. The publication describes the main criteria that allow to determine the character of the radiation field and to switch the dosimetric equipment to the required mode when measuring the ambient dose equivalent rate  $\dot{H}^*(10)$ . The correctness of the algorithm operation was verified by its practical realization in the dosimeter DKS-AT1123 during measurements made in the fields of nano- and microsecond pulse radiation with known dosimetric and temporal characteristics. It is shown that the dosimeter DKS-AT1123, when implementing such an algorithm, can detect the pulsed nature of the photon radiation field and correctly switch to the required mode of operation when measuring the ambient dose equivalent rate  $\dot{H}^*(10)$ . Implementation of this algorithm in the dosimeter DKS-AT1123, as well as other improvements of technical characteristics are planned in the course of its modernization.

**Keywords:** *linear electron accelerator, pulsed photon field, dosimetric equipment, automatic detection of pulsed radiation.*

*И.А.Алексейчук (нач.сект.), А.А.Загороднюк (вед.инж.), С.В.Лазаренко (вед.инж.), М.В.Масюкович (вед.инж.-констр.), А.Н.Новик (вед.инж.), В.И.Петров (гл.спец.по ПО), А.Ю.Тараев (вед.инж.)*

*Научно-производственное унитарное предприятие «АТОМТЕХ», г. Минск, Респ. Беларусь*

*Контакты: +375 29 171-13-72; zaharadniuk\_aa@atomtex.com*