

Ионизационная камера для измерений в полях импульсного фотонного излучения

В последние годы значительно расширилось использование импульсного фотонного излучения в медицине, промышленности и в обеспечении безопасности. Длительность импульсов, формируемых различными импульсными рентгеновскими излучателями, используемыми как в портативных системах с автономным питанием, так и в стационарных системах, может составлять всего несколько фемтосекунд. В то же время, большинство приборов радиационного контроля, в особенности различные активные электронные дозиметры, имеют ограничения при работе в импульсных полях. В данном исследовании представлены результаты измерений, проведенных с использованием режима интегрирования дозы в приборах типа RI-02 и Ram Ion на основе открытой ионизационной камеры при воздействии различных импульсных источников рентгеновского излучения. Сличение результатов, полученных с помощью дозиметрических приборов и термолюминисцентного дозиметра, использованного в качестве эталонного пассивного дозиметра, показало их хорошее соответствие (расхождение не превышает 10 %).

Ключевые слова: импульсная радиация фотона, ограничения активных электронных дозиметров, импульсный рентгеновский источник.

Д. Гинзбург (Rotem Industries Ltd, Отдел радиационного контроля, Израиль)

Введение. Импульсное рентгеновское излучение широко используется в таких областях как медицинская и ветеринарная диагностика, неразрушающий контроль и проверки с целью обеспечения безопасности [1,2]. Среди промышленных применений импульсного излучения можно упомянуть рентгенографию трубопроводов в нефтяной и газовой промышленности, контроль сварных соединений на судостроительных и авиационных заводах, контроль качества литья, контроль заливки бетона в строительстве и многое другое. Приложения в области обеспечения безопасности также широко распространены и включают в себя таможенный и пограничный контроль, судебно-медицинскую экспертизу и даже охрану

VIP-персон. Однако основное применение импульсного излучения связано с медициной, в особенности это относится к процедурам под рентгеновским контролем в интервенционной радиологии и кардиологии [3].

Импульсное излучение от различных источников рентгеновского излучения получают двумя различными способами: механическим, например, путем прерывания луча или с помощью вращающегося анода, и электрическим, например, путем разряда высоковольтного конденсатора с помощью искрового разрядника. Эти источники характеризуются различными длительностями импульса, энергией фотонов и значениями дозы в импульсе. Генераторы импульсов, основанные на электрическом методе, характе-

ризуются чрезвычайно короткими импульсами, длительность которых может измеряться наносекундами.

С точки зрения радиационной безопасности, люди, работающие в импульсных полях, могут подвергаться облучению в широком диапазоне мощностей доз. Особой проблемой является аварийное облучение непосредственно в пучке или от рассеянного излучения. Вопросам радиационной защиты при воздействии импульсного излучения посвящен ряд международных и национальных нормативных документов [4,5]. В основе этих документов лежат требования к контролю и регистрации доз облучения персонала. Таким образом, необходимость контроля с использованием дозиметров для контроля рабочих

мест и использованием индивидуальных дозиметров является общепризнанной. Во многих странах для официальной (юридически значимой) регистрации доз облучения обязательным требованием является использование пассивных индивидуальных дозиметров, таких как термолюминесцентные дозиметры (ТЛД). Исключением являются Швейцария и Великобритания, где допускается использование активных электронных индивидуальных дозиметров (далее – АИД) при условии, что они одобрены уполномоченными службами для использования в регистрации доз [6]. Еще несколько стран планируют разрешить использование АИД для целей официальной регистрации доз облучения. Хотя АИД обеспечивают пользователю определенные преимущества, их использование для измерения импульсного излучения может вызывать сомнения, или это может быть совсем невозможным [7,8] из-за того, что такие дозиметры изначально предназначены для работы в полях непрерывного, а не импульсного излучения.

Несмотря на то, что в некоторых публикациях сообщается об адекватном отклике АИД [9,10], отсутствие стандартизации характеристик АИД в полях импульсного излучения приводит к трудностям при их испытаниях и усиливает опасения в непредсказуемости функционирования таких устройств. Единственной инициативой в этом направлении является документ МЭК 62743

[11], в котором на международном уровне определены технические спецификации (ТС), которые необходимо пересмотреть и преобразовать в стандарт. В данных технических спецификациях МЭК и в других публикациях [12] рассматриваются критические технические параметры, которые должны учитываться при испытаниях типа АИД, в том числе:

t_{dead} – мертвое время дозиметра;
 T_{cycle} – длительность цикла измерения;

$H_{count,max}$ – максимальная измеряемая мощность дозы в импульсе излучения.

В данной публикации представлен и рассмотрен способ использования ионизационной камеры для измерения в полях импульсного излучения. Мы представляем результаты, полученные при измерении импульсного излучения от различных импульсных источников. Измерения выполнены дозиметрами на основе открытой ионизационной камеры и представлены в единицах экспозиционной дозы; для мягкого рентгеновского излучения эти единицы численно равны единицам амбиентного эквивалента дозы $H^*(10)$ (Зв). Проведено сравнение с результатами, полученными с помощью ТЛД, используемыми параллельно с указанными дозиметрами.

Оборудование и условия для проведения измерений. Было выполнено несколько серий измерений с использованием различных импульсных рентгеновских излу-

чателей. Измерения в импульсных полях выполнялись с использованием дозиметрических приборов на основе ионизационной камеры и эталонных термолюминесцентных дозиметров.

В эталонных термолюминесцентных дозиметрах использовались трехэлементные карты с ТЛ-детекторами типа TLD-100H LiF: Mg, Cu, P производства компании Thermo Scientific [13]. Этот тип характеризуется энергетической зависимостью чувствительности 0,98 (от 30 кэВ до энергии 1,25 МэВ источника ^{60}Co), при этом чувствительность не зависит от мощности дозы вплоть до 1000 МГр·с⁻¹. Калибровка ТЛД была выполнена с источником ^{137}Cs в калибровочной лаборатории по вторичному дозиметрическому эталону.

Источники рентгеновского излучения. Для проведения испытаний были использованы три различных источника рентгеновского излучения. Все источники были производства компании Golden Engineering [14-16] и отличались энергией фотонов и дозой в импульсе. Основные характеристики источников приведены в табл.1.

Можно заметить, что хотя длительность импульса составляет 50–60 нс, что соответствует постоянной времени разряда высоковольтного конденсатора, количество импульсов в секунду невелико (интервалы между импульсами составляют десятки миллисекунд). Это дает время на охлаждение вольфрамовой мишени и разрядника и на перезарядку высоковольтного конденсатора. Максимальный рабочий цикл всех использованных для испытаний рентгеновских источников – 200 импульсов в 4 минуты (3000 импульсов в час). Самая большая серия импульсов для XR200 и

Табл. 1. Основные параметры импульсных рентгеновских излучателей.

Рентгеновский излучатель	Параметры			
	Макс. энергия фотонов [кВ]	Длительность импульса [нс]	Доза в импульсе [мкЗв] ^a	Количество импульсов в секунду
XR200	150	60	26–40	25
XRS-3	270	60	26–40	15
XRS-4	370	50	40–70	10

^a Измеряется на расстоянии 30 см от источника рентгеновского излучения (в пучке).

XRS-3 составляет 99 импульсов подряд, а для XRS-4 – 199 импульсов.

Дозиметрические приборы на основе ионизационной камеры.

При проведении испытаний были использованы два портативных дозиметра на основе открытой цилиндрической ионизационной камеры производства компании Rotem Industries Ltd [17,18]. Основные параметры приборов приведены в табл.2. Следует отметить, физически эти приборы отличаются в основном объемом ионизационной камеры, от чего зависят динамический диапазон по мощности дозы и чувствительность. К другим отличиям относятся конструктивное исполнение, дизайн и аспекты, связанные с эргономикой (рис.1).

Некоторые другие характеристики приборов: энергетическая зависимость $\pm 20\%$ (относительно ^{137}Cs) в диапазоне от 20 кэВ до 1,3 МэВ у обоих приборов; угловая зависимость $\pm 5\%$ (для $\pm 120^\circ$ относительно фронтального направления) у Ram Ion и $\pm 10\%$ (для $\pm 135^\circ$ относительно фронтального направления) для RI-02. Дозиметры соответствуют требованиям аме-

Табл.2. Основные параметры ионизационных камер.

Прибор	Параметры			
	Диапазон измерения мощности дозы [мЗв/ч]	Диапазон измерения дозы [Зв]	Объем камеры [см ³]	Нижний предел диапазона энергий излучения [кэВ]
Ram Ion	0,001–500	< 10	500	20
RI-02	0,001–1000	< 10	350	20

риканского стандарта ANSI 42.17A-2003 «Эксплуатационные характеристики приборов для измерения ионизирующих излучений. Портативные приборы для использования при нормальных условиях окружающей среды» [19] и прошли испытания в соответствии с данным документом в лаборатории, аккредитованной Службой аккредитации Великобритании (UKAS). Оба прибора оснащены высокочувствительными электрометрами с низким уровнем шума. Электрометр измеряет ток, возникающий на электроде в камере под действием излучения. Расчетная чувствительность камеры большего объема составляет 4,3 фА на 1 мкЗв/ч, а для камеры меньшего объема – 3 фА на 1 мкЗв/ч. На плате процессора расположен микроконтроллер со специальным программным обеспечением и алгоритмами для расчета и отображения показаний на экране прибора. При

использовании в полях непрерывного излучения прибор должен отображать результаты в единицах мощности дозы. Измерения импульсного излучения выполнены в режиме интеграции дозы.

Измерение импульсного излучения ионизационной камерой. Принцип измерения импульсного рентгеновского излучения ионизационными камерами основан на сборе заряда, образующегося в камере; сбор заряда производится достаточно быстро, чтобы исключить рекомбинацию и диффузию и обеспечить восстановление до того, как в камеру поступит следующий импульс излучения. Это можно обеспечить благодаря работе камеры в режиме постоянного тока, а также благодаря тому, что приложенный к электродам потенциал достаточно высок, чтобы уменьшить эффект рекомбинации заряда [20]. Измерение



Рис.1. Два дозиметрических прибора с ионизационной камерой. Слева – Ram Ion. Справа – RI-02.



Рис.2. Измерительные позиции. Желтый цвет – безопасное место по данным производителя. Красный цвет – максимальная мощность дозы 20 мкЗв·ч⁻¹.

тока в результате сбора заряда осуществляется косвенным образом путем измерения падения напряжения на сопротивлении, включенном последовательно с собирающим электродом.

Ток, образованный под действием коротких импульсов излучения, можно оценить по формуле:

$$I = (H_{pulse} \cdot \epsilon) / t_{pulse},$$

где H – доза, поступающая с одним импульсом (мкЗв), t – длительность импульса (ч), ϵ – чувст-

вительность камеры (А/мкЗв·ч⁻¹). Исходя из дозы в импульсе (~40 мкЗв), длительности импульса (60 нс) и чувствительности камеры (среднее значение 3,65 фА на 1 мкЗв·ч⁻¹), ожидаемое значение тока составит 8,76 мА, что слишком много и приведет к слишком большой разности потенциалов на резисторе обратной связи электрометра. Однако этот ток является импульсным, соответствующим образованному заряду

(dQ/dt). С учетом постоянной времени (RC) резистора обратной связи (порядка 10¹¹ Ом), соединенного с емкостью камеры (порядка 10⁻¹² Ф), этот заряд собирается в течение нескольких десятых долей секунды. Этот процесс можно рассматривать как уширение импульса излучения.

Оборудование и условия для проведения испытаний. Измерения выполнялись при трех раз-

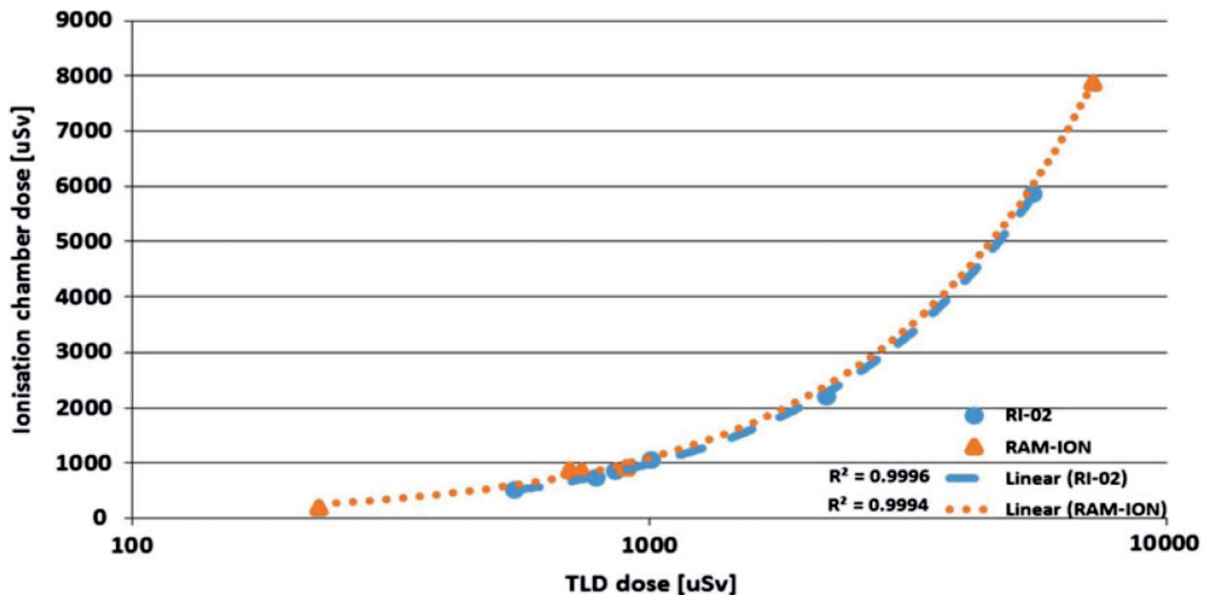


Рис.3. Сравнение значений доз, полученных с помощью ионизационных камер и ТЛД. Ось X – показания ТЛД (мкЗв) в логарифмическом масштабе; ось Y – показания ионизационной камеры (мкЗв).

Табл. 3. Воспроизводимость и согласованность результатов измерений, выполненных дозиметрическими приборами RI-02 и Ram Ion в полях импульсного излучения.

Рентгеновский излучатель	Прибор RI-02			Прибор Ram Ion			
	XRS-3	XRS-4	XR200	XRS-3	XRS-4	XRS-4	XR200
Количество импульсов	10	10	99	1	1	50	99
Количество повторений	20	20	3	10	3	3	4
Средняя доза на повторение (мкЗв)	25,25	36,7	44,33	2,66	4,33	3,94	0,26
Коэффициент вариации (RSD)	4 %	4 %	4 %	9 %	2 %	2 %	9 %
Средняя доза в импульсе (мкЗв)	2,53	3,67	0,45	2,66	4,33	0,0787	0,0026 ^a
Расстояние от источника до детектора (м)	1,2	1,2	0,6	1,2	1,2	0,6	1,2
Позиция детектора	I	I	I	I	I	II	III

^a Соответствует наименьшему измеренному значению дозы в импульсе (2,6 нЗв), когда детектор расположен позади источника на расстоянии 1,2 м.

личных позициях детектора относительно источника. Положения описываются следующим образом:

- детектор находится в прямом пучке – Позиция I;
- детектор расположен сбоку источника в пределах предложенного расстояния – Позиция II;
- детектор расположен сзади источника в пределах предложенного расстояния – Позиция III.

Места расположения детектора (рис.2) были выбраны таким образом, чтобы смоделировать все возможные предельные условия. Позиция I соответствует максимально возможной дозе облучения, когда источник непосредственно облучает объект, позиции II и III являются показательными для минимальной дозы, которая может создаваться в объекте за счет рассеянного излучения.

Были выполнены серии отдельных измерений. Каждое измерение проводилось с одновременным использованием ионизационных камер и ТЛ дозиметра в качестве эталона. Кроме того, на протяжении всех измерений был использован накопительный ТЛД, который позволил подтвердить сочетаемость суммы доз индивидуальных измерений. Инструменты устанавливались на различных расстояниях от источника и подвергались облучению при различ-

ных количествах импульсов излучения. Если ожидаемая доза была ниже предела регистрации ТЛД-считывателя (< 100 мкЗв), облучение повторялось несколько раз с одним и тем же ТЛ дозиметром. Эта процедура также позволила определить воспроизводимость доз, измеренных ионизационными камерами.

Результаты. Полученные результаты обработаны и проанализированы с целью определения следующих характеристик: линейность и соответствие показаниям ТЛД, согласованность и воспроизводимость, пределы детектирования.

Рис.3 демонстрирует линейность обеих ионизационных камер в широком диапазоне доз, начиная с доз примерно 200 мкЗв и вплоть до 10 мЗв. Приборы показали хорошую корреляцию с результатами, полученными с помощью ТЛД, что демонстрируется коэффициентом корреляции (R^2), расхождение не превышает 10 %.

Для проверки воспроизводимости измеренных значений каждое измерение повторяли заданное число раз и регистрировали дозу для каждой серии импульсов. Были рассчитаны среднее значение дозы и коэффициент вариации (RSD). Данные приведены в табл.3. Очевидно, что малое зна-

чение RSD (4 % для RI-02 и менее 9 % для Ram Ion) отображает согласованность измерений. Расчетное значение средней дозы в импульсе находится в хорошем согласии с заявленными данными производителей импульсных рентгеновских излучателей при пересчете с учетом расстояния. Поскольку благодаря своей конструкции обе ионизационные камеры имеют относительно плоскую энергетическую характеристику, нет необходимости в компенсации по энергии излучения. Таким образом, доза в импульсе остается точной для источников с различными энергиями рентгеновского излучения.

Наименьшая измеряемая доза в импульсе в процессе испытаний составила 2,6 нЗв. Данная доза была измерена на расстоянии 1,2 м позади источника при расположении детектора в позиции III. Однако это значение не является пределом детектирования. Могут быть зарегистрированы и более низкие дозы, однако имеются ограничения при отображении показаний на дисплее приборов. Показания на Ram Ion начинаются со значения 0,01 мкЗв, а RI-02 отображает дозу, начиная с 1 мкЗв. Это связано с тем, что у данных приборов имеются различия по динамическому диапазону и по чувствительности в диапазоне низких доз.

Табл.4. Ограничения приборов Ram Ion и RI-02.

Частота, имп/с	Максимальная мощность дозы на 0,3 м [мЗв/ч] ^a	Минимальное эффективное расстояние [м]	
		Ram Ion	RI-02
15 (номинал)	2160	0,63	0,44
5	720	0,36	0,25
1 ^b	144	0,16	0,12

^a Максимальная мощность дозы получена исходя из максимальной дозы в импульсе 40 мкЗв (согласно технического описания производителя источника рентгеновского излучения).

^b Один импульс в секунду примерно соответствует максимальному рабочему циклу 3000 импульсов в час (согласно технического описания производителя источника рентгеновского излучения).

Верхние пределы детектирования получены на основе диапазонов измерения приборов (табл.4).

Поскольку RI-02 имеет более высокий диапазон измерений, данный прибор можно использовать в полях с более высокой мощностью дозы, чем в случае с Ram Ion. При расположении прибора максимально близко к источнику (до 0,44 м) ожидаемая мощность дозы (2160 мЗв/ч) находится в пределах рабочего диапазона. При размещении приборов в полях с мощностью дозы, превышающей максимальную измеримую, на индикаторе прибора будет отображено предупреждение о перегрузке. С учетом этого, с точки зрения эксплуатации, даже если мощность дозы находится за пределами диапазона измерения при-

бора, можно получить имеющее смысл показание, расположив прибор дальше от источника.

Выводы. Проведены испытания двух дозиметрических приборов на основе ионизационной камеры в полях импульсного излучения, формируемых импульсными рентгеновскими излучателями. Приборы показали результаты, хорошо совпадающие (в пределах ~10 %) с показаниями ТЛД, использовавшихся в качестве эталона. Определены верхний и нижний пределы детектирования дозиметрических приборов. Импульсное излучение имело форму очень коротких импульсов с очень высокой мощностью дозы. Предположительно, такие значения мощности дозы ниже, чем у

источников рентгеновского излучения, используемых в медицине для диагностики, в связи с большей длительностью импульсов у последних. Кроме того, приборы имеют плоскую энергетическую характеристику $\pm 20\%$ для энергий фотонного излучения в диапазоне от 20 кэВ до 1,3 МэВ. Это позволяет использовать приборы для точной дозиметрии в самых различных областях применения импульсного излучения.

По своим размерам данные дозиметрические приборы намного больше активных индивидуальных дозиметров, которые можно поместить в карман, и не претендуют на то, чтобы заменить их. Тем не менее, благодаря отличному функционированию в импульсных полях и с учетом отсутствия АИД, которые могли бы обеспечить надлежащие характеристики, эти приборы можно рассматривать в качестве наилучшего выбора в данных видах применения.

Благодарности. Автор хотел бы благодарить сотрудников Vidisco Ltd (www.vidisco.com) за техническую поддержку и за предоставление импульсных рентгеновских излучателей для проведения испытаний.

Литература

- Schmidt, C., et al. Current problems in the field of radiation protection technique - use of active personal dosimeters (APD) in pulsed radiation fields. Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety (BMU), 2009.
- Klammer, J., Roth, J. and Hupe, O. Novel reference radiation field for pulsed photon radiation installed at PTB. Radiat. Prot. Dosim. 151(3), 2012. P. 478-482.
- Rehani, M. IWE-B-213CD-01: international actions on radiation safety in fluoroscopic procedures performed outside radiology departments. Med. Phys. 39(6), 2012. P. 39-41.
- The International Commission on Radiological Protection. Radiological Protection in Fluoroscopically Guided Procedures Performed Outside the Imaging Department. ICRP Publication 117. Ann. ICRP 40(6) Elsevier, 2010. P. 1-102.
- International Commission on Radiation Units and Measurements. The Dosimetry of Pulsed Radiation. ICRU Report 34. Medical Physics 11(2), American Institute of Physics (AIP), 1984. P. 222.

Литература (продолжение)

6. Bolognese-Milsztajn, T., Ginjaume, M., Luszik-Bhadra, M., Vanhavere, F., Wahl, W. and Weeks, A. Active personal dosimeters for individual monitoring and other new developments. *Radiat. Prot. Dosim.* 112 (1), 2004. P. 141-68.
7. Ankerhold, U., Hupe, O. and Ambrosi, P. Deficiencies of active electronic radiation protection dosimeters in pulsed fields. *Radiat. Prot. Dosim.* 135, 2009. P. 149-153.
8. Clairand, I., et al. Active personal dosimeters in interventional radiology: tests in laboratory conditions and in hospitals. *Radiat. Prot. Dosim.* 144(1-4), 2011. P. 453-458.
9. Chiriotti, S., et al. Performance of several active personal dosimeters in interventional radiology and cardiology. *Radiat. Meas.* 46(11), 2011. P. 1266-1270.
10. Zutz H. and Hupe O. Recent results of irradiations of DIS-1 dosimeters with an XR200 X-ray flash unit. *Radiat. Prot. Dosim.* 154(4), 2013. P. 401-404.
11. International Electrotechnical Commission. Radiation protection instrumentation—Electronic counting dosimeters for pulsed fields of ionizing radiation. Technical specification IEC 62743, Geneva, 2012.
12. Ambrosi, P., Borowski, M., and Iwatschenko, M. Considerations concerning the use of counting active personal dosimeters in pulsed fields of ionising radiation. *Radiat. Prot. Dosim.* 139(4), 2010. P. 483-493.
13. Thermo Scientific. TLD-100 LiF: Mg, Cu, P - Material Datasheet. Thermo Scientific.
14. Golden Engineering Inc. XR200 X-Ray Source Operator's Manual. Golden Engineering Inc.
15. Golden Engineering Inc. XRS-3 X-Ray Source Operator's Manual. Golden Engineering Inc.
16. Golden Engineering Inc. XRS-4 X-Ray Source Operator's Manual. Golden Engineering Inc.
17. Rotem Industries Ltd. RI-02 Portable Ion chamber survey meter – Datasheet. Rotem Industries Ltd.
18. Rotem Industries Ltd. RAM ION Monitor - Datasheet. Rotem Industries Ltd.
19. American National Standards Institute. American National Standard for Performance Specifications for Health Physics Instrumentation-Portable Instrumentation for Use in Normal Environmental Conditions, ANSI42.17A, 2003.

Ionisation Chamber for Measurement of Pulsed Photon Radiation Fields

Ginzburg Dmitry (Rotem Industries Ltd, Radiation Detection Department, Israel)

Abstract. The use of pulsed photon radiation in medical, industrial and security sectors has vastly increased during the recent years. The length of pulse from different X-ray flash generators that are commonly used as either portable, battery-operated or fixed systems can be as low as a few femtoseconds. However, the majority of radiation protection instruments, especially various active electronic dosimeters, have limitations when operated in pulsed fields. This study presents measurements that were performed using the dose-integration mode of the RI-02 and Ram Ion survey metres, which are based on ventilated ionisation chamber, when exposed to different pulsed X-ray sources. An intercomparison between the results that were obtained with the survey metres and those that were obtained with thermoluminescence dosimeter, reference passive dosimeter, show good agreement (deviation lies within 10 %).

Key words: *pulsed photon radiation, limitations of active electronic dosimeters, pulsed X-ray source.*

Д. Гинзбург (зав.отд.) – Rotem Industries Ltd, Отдел радиационного контроля, Израиль.
Контакты: тел.: +972-8-6564730; e-mail: dimgiz@rotemi.co.il.