

Государственный первичный эталон единиц потока, плотности потока и переноса электронов, потока энергии, плотности потока и переноса энергии электронного и тормозного излучений

И. А. ХАРИТОНОВ, И. И. ЦВЕТКОВ

Приведены результаты работ по созданию и исследованию нового государственного первичного эталона единиц потока электронов, плотности потока электронов и переноса электронов, потока энергии, плотности потока энергии и переноса энергии электронного и тормозного излучений с энергией до 50 МэВ. Приведены характеристики зарубежных аналогов и результаты сличений в системе лабораторий вторичных дозиметрических стандартов.

The results of development and investigations of the new State primary standard for electron flux, flux density and fluence, for electron and radiation flux energy, flux density energy and fluence energy with energy less than 50 MeV are presented. The characteristics of the foreign analogies and the results of comparisons in SSDL system are presented.

Исследования полей высокоэнергетических ионизирующих излучений проводятся во ВНИИМ им. Д.И. Менделеева с 1965 г. В 1975 г. были утверждены ГЭТ 72—75 [1] и ГЭТ 93—75 [2]. При проведении мероприятий по внедрению эталонов были созданы основы метрологического обеспечения (МО) измерений радиометрических и дозиметрических характеристик полей электронных ускорителей промышленного и медицинского назначения как на этапе пусконаладочных работ, так и в режиме их эксплуатации [3, 4], а также разработаны методики поверки средств измерений [5, 6]. В период 1975—1985 гг. был проведен ряд исследований, которые показали преимущество комплексного воспроизведения единиц взаимосвязанных величин [7, 8]. Накопленный опыт исследований и конструкторских работ позволил в 1985 г. приступить к созданию эталонного комплекса для совместного воспроизведения взаимосвязанных единиц основных физических величин, характеризующих поля электронного и тормозного излучений.

Эти работы были завершены созданием нового эталона, утвержденного в 2001 г. в качестве государственного первичного эталона единиц потока электронов, плотности потока электронов и флюенса (переноса) электронов, потока энергии, плотности потока энергии и флюенса (переноса) энергии электронного и тормозного излучений с присвоением ему регистрационного номера ГЭТ 72—01 (взамен ГЭТ 72—75 и ГЭТ 93—75).

В ГЭТ 72—01 использованы зарядовый, калориметрический, электрофизический и ионизационный методы измерения основных физических величин, характеризующих поле излучения электронного ускорителя с максимальной энергией электронов от 0,1 до 50 МэВ. Применение нескольких независимых методов измерения позволяет осуществлять совместное воспроизведение единиц следующих физических величин: потока электронов и потока энергии электронов; переноса электронов и переноса энергии электронов; плотности потока энергии и переноса энергии тормозного излучения.

В комплекс средств измерений ГЭТ 72—01 входят первичные измерительные преобразователи: цилиндр Фарадея (ЦФ-1, ЦФ-3, ЦФ-РЭП, ЦФ-4); калориметр-цилиндр Фарадея (КЦФ-1, КЦФ-РЭП); калориметр полного поглощения (КПЭ-1); толстостенная ионизационная камера (ИКВ-6, ИКВ-6.1); магнитоиндукционный преобразователь (МИП-10); алмазный детектор (УДМС-1к); измерительные каналы с электрометрами типа В7Э-42, В2-38 и вычислительный комплекс на базе IBM PC/AT с программным обеспечением для сбора, обработки и представления результатов измерений. В состав эталона включены двухкоординатное и трехкоординатное автоматизированные перемещающие устройства для обеспечения условий воспроизведения единиц. Базовым источником излучения является ускоритель типа Б50-50 (ВНИИМ). В рамках научного сотрудничества с ЦНИРентгенрадиологическим институтом, НИИ онкологии им. Н.Н. Петрова и НИЦ-2 4 ЦНИИ МО РФ используются поля излучений ускорителей типов ЛУЭВ-15М, SL75-5МТ, ЭЛУ-4, ЛУЭ-40 и М-3.

Основные метрологические и технические характеристики преобразователей, полученные в результате расчетов и исследований, приведены в табл. 1.

В табл. 1 приняты следующие обозначения: E_0 — максимальная энергия электронного излучения; $\Phi_{n(E_0, t)}$ — поток электронов; $K_{0(E_0)}$ — коэффициент преобразования; S_0 — площадь поперечного сечения окна вводного канала преобразователя; $\Phi_{(E_0, t)}$, $\Psi_{E(E_0, t)}$, $F_{E(E_0, t)}$ — поток энергии, плотность потока энергии, перенос энергии, соответственно; D_n — диаметр пучка излучения.

По результатам исследований ГЭТ 72—01 обеспечивает воспроизведение единиц в диапазоне:

Метрологические и технические характеристики преобразователей

Тип преобразователя	E_0 , МэВ	$\Phi_n(E_0, t)$, c^{-1}	$\Phi_E(E_0, t)$, Вт	$\Psi_E(E_0, t)$, $Вт \cdot см^{-2}$	$K_0(E_0)$	s_0 , $см^2$	$F_E(E_0, t)$, $Дж \cdot см^{-2}$	K_0	D_n , мм	Материал поглотителя
ЦФ-3	1—50	$1,0 \cdot 10^{10}$ — $1,0 \cdot 10^{16}$	—	—	1,05	—	—	—	—	Графит— алюминий— свинец
ЦФ-РЭП	0,1—10	$1,0 \cdot 10^{14}$ — $1,0 \cdot 10^{21}$	—	—	1,01	0,95	—	—	—	Графит ОСЧ-МГ
ЦФ-4	0,1—10	$1,0 \cdot 10^8$ — $1,0 \cdot 10^{10}$	—	—	1,01	44,2	—	—	—	Графит ОСЧ-МГ
ЦФ-1	1—50	$1,0 \cdot 10^8$ — $1,0 \cdot 10^{21}$	—	—	1,00	23,7	—	—	—	Графит— алюминий— свинец
КПЭ-1: тормозное излучение	5—50	—	10^{-4} — 10	10^{-5} — 10^{-1}	1,005	38,46	10^{-3} — 10	27,93 Дж/Ом	—	—
электронное излучение	5—50	—	10^{-4} — 10	10^{-5} — 10^{-1}	1,002	33,17	10^{-3} — 10	35,42 Дж/Ом	—	—
МИП-10	1—1000	$1,0 \cdot 10^{12}$ — $1,0 \cdot 10^{21}$	—	—	—	—	—	—	Не бо- лее 10	Материал сердечни- ка — пер- маллой
ИКВ-6	1—100	—	$1,0 \cdot 10^{-4}$ — 10	$1,0 \cdot 10^{-5}$ — 10^{-1}	—	—	$1,0 \cdot 10^{-3}$ — 10^{-2}	$4,12 \cdot 10^5$ Дж/Кл	Не бо- лее 300	Д16
ИКВ-6.1	1—100	—	$1,0 \cdot 10^{-4}$ — 10	$1,0 \cdot 10^{-5}$ — 10^{-1}	—	—	$1,0 \cdot 10^{-3}$ — 10^{-2}	$4,08 \cdot 10^5$ Дж/Кл	Не бо- лее 120	Д16
АД-УДМС-1к	0,1—50	—	—	—	1,01	0,03	—	—	—	Якутский алмаз
КЦФ-РЭП	0,1—10	—	$1,0 \cdot 10^{-2}$ — 10^3	$1,0 \cdot 10^{-1}$ — 10^2	—	0,95	$1,0 \cdot 10^{-2}$ — 10^3	$4,34 \cdot 10^4$ Дж/В	1000×100	—
КЦФ-1	1—50	—	$1,0 \cdot 10^{-2}$ — 10^2	$1,0 \cdot 10^{-5}$ — 10	—	19,6	$1,0 \cdot 10^{-2}$ — 10^2	$4,08 \cdot 10^4$ Дж/В	Не бо- лее 500	—

поток электронов, c^{-1} 10^{10} — 10^{21} ;
 плотность потока электронов, $см^{-2} \cdot c^{-1}$ 10^8 — 10^{19} ;
 перенос электронов, $см^{-2}$ 10^9 — 10^{21} ;
 поток энергии, Вт 10^{-4} — 10^3 ;
 плотность потока энергии, $Вт \cdot см^{-2}$ 10^{-5} — 10^2 ;
 перенос энергии, $Дж \cdot см^{-2}$ 10^{-3} — 10^3

в поле импульсного тормозного и электронного излучений с энергией от 0,1 до 50 МэВ со средним квадратическим отклонением результата измерений S_0 , не превышающим $5 \cdot 10^{-3}$ при десяти независимых измерениях, и неисключенной систематической погрешностью Θ_0 , находящейся в пределах $1 \cdot 10^{-2}$ — $2 \cdot 10^{-2}$ при $P = 0,99$. Суммарная стандартная неопределенность воспроизведения единиц u_c составляет $(6—9) \cdot 10^{-3}$.

Программное обеспечение эталона — системное, тестовое и прикладное. Системное программное обеспечение — операционная система из программного продукта, поставляемого с ПЭВМ IBM PC/AT. Тестовое обеспечение разработано в процессе создания эталона, предназначено для проверки работоспособности оборудования, входящего в состав измерительно-вычислительного комплекса, и состоит из программ проверки работоспособности графитового, воздушного и водного фантомов и крейта. Прикладное обеспечение предназначено для сбора и обработки информации при

работе с графитовым, воздушным и водным фантомами, калориметрами и графопостроителем. Кроме того, разработана программа-модуль со следующими возможностями: обмен между измерительными приборами и ПК по каналу общего пользования (КОП), управление двухкоординатным перемещающим устройством, проведение измерений основных параметров полей излучения ускорителя с помощью средств измерений и двухкоординатного перемещающего устройства, интерактивного режима работы оператора и ПК. По степени использования современных электроизмерительных приборов, достоверности методов измерения основных физических величин полей тормозного и электронного излучений, точности первичных преобразователей, по уровню автоматизации процесса измерений, объему вспомогательного оборудования и программному обеспечению эталон соответствует современному уровню измерительной техники и зарубежным аналогам. Обобщенной оценкой уровня разработки и создания эталона может служить его сравнение с зарубежными аналогами по функциональным возможностям при их использовании в практике метрологического обеспечения в области измерений высокоэнергетических излучений. Результаты сравнений метрологических характеристик отечественных и зарубежных средств измерений при их практическом использовании на уровне вторичных эталонов представлены в табл. 2.

Результаты сравнений метрологических характеристик отечественных и зарубежных СИ при их практическом использовании на уровне вторичных эталонов

Страна	Организация	Физическая величина	Тип преобразователя	Диапазон измерений	Погрешность, %	Источник
Россия	ВНИИМ—НИИЭФА	Поток энергии Плотность потока энергии	P-2 (ВНИИМ) Детектор прямой зарядки — ДПЗ	$0,5 \cdot 10^{-6}$ —50 Вт $0,5 \cdot 10^{-6}$ — $1,0 \cdot 10^{-1}$ Вт/см ²	2,0—4,0	[9]
	СНИИП	Поток энергии Плотность потока энергии	Калориметр Гаусс-квантометр P-2 (СНИИП)	$0,5 \cdot 10^{-7}$ — $1,0 \cdot 10^{-2}$ Вт $0,5 \cdot 10^{-6}$ — $1,0 \cdot 10^{-3}$ Вт/см ²	2,0—4,0	[10]
США	NIST-LAST (Los Alamos National Laboratory)	Поток заряженных частиц Плотность потока заряженных частиц Поток энергии	Цилиндр — Фарадея,	до $4,0 \cdot 10^{15}$ с ⁻¹	0,5	[11]
			Цифровой калориметр	до 10 Вт (при энергии от 5 до 185 МэВ)	1,0	
ФРГ	Max-Planck Institute	Энергия излучения Поток фотонов Поток энергии	Комптоновский спектрометр	до 10 Вт (при энергии от 5 до 50 МэВ)	1,0—1,5	[12]
Франция	BERGOZ Precision Beam Instrumentation	Поток электронов (заряженных частиц)	Магнитоиндукционный преобразователь	$3,0 \cdot 10^{15}$ — $3,0 \cdot 10^{20}$ с ⁻¹	1,0—1,5	[13]

Таблица 3

Результаты международных сличений поглощенной дозы в воде D_w фотонного излучения

Год	Организация — участник сличения	Облучательная установка	Значение D_w , Гр		$\delta = \frac{D_{w1} - D_{w0}}{D_{w0}} 100, \%$
			Участник сличения — D_{w1}	МАГАТЭ — D_{w0}	
1988	ЦНИРРИ	РОКУС	2,000	2,013	-0,6
1990	НИИ онкологии	Ускоритель ЛУЭВ-15М	2,000	1,944	2,9
1994	НИИ онкологии	Ускоритель ЛУЭВ-15М	2,000	1,835	9,0 (до аттестации поля излучения) 2,0 (после аттестации поля излучения)
1996	ЦНИРРИ	РОКУС	2,000	2,070	-3,4 1,7
		Ускоритель SL75-5	1,980	1,947	
1999	ЦНИРРИ	Ускоритель SL75-5	2,000	1,990	1,0

Передача размера единиц радиометрических и дозиметрических физических величин от государственного первичного эталона вторичным эталонам осуществляется методом непосредственного сличения. В период 1985—2000 гг. при внедрении разработанных методов измерения были выполнены работы по аттестации полей излучения промышленных и медицинских ускорителей, а также экспериментальные, метрологические исследования средств измерений в составе ускорительных комплексов [14—21]. С 1992 г. ВНИИМ является участником международных сличений по линии МАГАТЭ на уровне лабораторий вторичных дозиметрических стандартов (система SSDL) с помощью термоминесцентных дозиметров и использует в качестве источников излучения радионуклидные и ускорительные установки ЦНИРентген-радиологического института и НИИ онкологии им. Н.Н. Петрова (г. Санкт-Петербург), с которыми имеет соответствующие соглашения о сотрудничестве.

Перед проведением сличений поля излучений аттестуют сличением с эталоном ГЭТ 72—01 с погрешностью, не превышающей 2 %. Результаты международных сличений поглощенной дозы в воде — D_w фотонного излучения приведены в табл. 3.

В соответствии с планом мероприятий по внедрению ГЭТ 72—01 и государственной поверочной схемы, вторичные эталоны предполагается создать в научно-исследовательских центрах, непосредственно связанных с изготовлением и эксплуатацией ускорительной техники медицинского и промышленного назначения.

В России и странах СНГ в настоящее время применяют несколько сот ускорителей электронного, тормозного и протонного излучений. Реализуются совместные проекты по модернизации отечественных медицинских ускорительных центров, поставке ускорителей в страны Юго-Восточной Азии, Африки и другие регионы. Ответственность работ по метрологическому обеспечению измерений в данной области повышается с ростом сложности и стоимости ускорителей, расширением областей их применения в радиационных технологиях, диагностических и терапевтических процедурах. Создание нового эталона является очередным этапом совершенствования системы метрологического обеспечения средств измерений высокоэнергетического излучения, который даст новый импульс развитию ускорительной техники и приборостроения в этой области измерений.

ЛИТЕРАТУРА

1. **ГОСТ 8.201—76. ГСИ.** Государственный специальный эталон и общесоюзная поверочная схема для средств измерений потока энергии тормозного излучения с граничной энергией фотонов от 0,8 до 8,0 пДж (от 5 до 50 МэВ).

2. **ГОСТ 8.202—76. ГСИ.** Государственный первичный эталон и общесоюзная поверочная схема для средств измерений потока электронов и потока энергии электронов с максимальной энергией электронов от 0,8 до 8,0 пДж (от 5 до 50 МэВ).

3. **Фоминых В.И., Цветков И.И.** // Isotopenpraxis. — 1981. — V. 17. — P. 3.

4. **Фоминых В.И., Цветков И.И.** // Радиационная дозиметрия. — 1982. — № С. 27.

5. **ГОСТ 8.087—81. ГСИ.** Установки поверочные дозиметрические электронного и фотонного излучения. Методы поверки.

6. **МИ 1136—86.** Методические указания. Средства измерений потока, плотности потока и переноса (флюенса) энергии фотонного и электронного излучения. Методы поверки.

7. **Цветков И.И., Фоминых В.И., Забродин Б.В.** // Тр. IV Всесоюз. совещ. по применению ускорителей заряженных частиц в народном хозяйстве. — Л., 1982.

8. **Цветков И.И., Фоминых В.И., Кисельникова Г.В.** Первичный измерительный преобразователь — калориметр-цилиндр Фарадея. — Л.: ЦТИ, 1982.

9. **Паспорт** эталона ВЭТ 72—02.

10. **Паспорт** эталона ВЭТ 72—01.

11. **Faraday-cup monitors for high-energy electron beams.** // Rev. Sci. Inst. — 1980. — V. 27. — N 9.

12. **Lehr H., Hinderer G., Maier K.H.** Untersuchungen zur Optimierung eines aus Strahlführung und Kernphysikalischen detektoren bestehenden experimentier-systems. — HMI B 259, 1987.

13. **The beam charge monitors of «BERGOZ».** The Catalogue 1999.

14. **Карасев С.П., Уваров В.Л., Цветков И.И.** // Вопросы атомной науки и техники. — 1998. — № 3. С. 36.

15. **Карасев С.П. и др.** // Тр. XV Междунар. семинара по линейным ускорителям заряженных частиц. — Алушта, 1997.

16. **Харитонов И.А., Цветков И.И.** // Тр. XI Всерос. совещ. по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине. — Санкт-Петербург, 1998. — С. 48.

17. **Карасев С.П. и др.** // Вопросы атомной науки и техники. — 1998. — № 3. — С. 32.

18. **Карасев С.П. и др.** // Тр. XVI Междунар. семинара по линейным ускорителям. — Алушта, 1999. — С. 56.

19. **Карасев С.П. и др.** // Там же. — С. 33.

20. **Бутенко А.А. и др.** // Там же. — С. 65.

21. **МИ 2544—99.** Методические указания. Ускорители заряженных частиц. Организация и порядок проведения аттестации.

Дата одобрения 11.07.2001 г.