

ГОДИШНИК НА СОФИЙСКИЯ УНИВЕРСИТЕТ „СВ. КЛИМЕНТ ОХРИДСКИ“
ФИЗИЧЕСКИ ФАКУЛТЕТ, ЮБИЛЕЙНО ИЗДАНИЕ
130 ГОДИНИ СОФИЙСКИ УНИВЕРСИТЕТ
и 55 ГОДИНИ ФИЗИЧЕСКИ ФАКУЛТЕТ
„Нови научни постижения и направления във Физически факултет“

ANNUAL OF SOFIA UNIVERSITY “ST. KLIMENT OHRIDSKI”
FACULTY OF PHYSICS, JUBILEE EDITION
130th ANNIVERSARY OF SOFIA UNIVERSITY
and 55th ANNIVERSARY OF FACULTY OF PHYSICS
“New scientific achievements and directions in the Faculty of Physics”

СЪЗДАВАНЕ НА TDCR СИСТЕМА ЗА АБСОЛЮТНО ИЗМЕРВАНЕ НА АКТИВНОСТ ВЪВ ФИЗИЧЕСКИЯ ФАКУЛТЕТ НА СОФИЙСКИЯ УНИВЕРСИТЕТ „СВ. КЛИМЕНТ ОХРИДСКИ“

КРАСИМИР МИТЕВ, ЧАВДАР ДУЦОВ

Катедра Атомна физика

Красимир Митев, Чавдар Дуцов. СЪЗДАВАНЕ НА TDCR СИСТЕМА ЗА АБСОЛЮТНО ИЗМЕРВАНЕ НА АКТИВНОСТ ВЪВ ФИЗИЧЕСКИЯ ФАКУЛТЕТ НА СОФИЙСКИЯ УНИВЕРСИТЕТ „СВ. КЛИМЕНТ ОХРИДСКИ“

В работата е представена разработената във ФзФ на СУ система за абсолютно измерване на активност на алфа- и бета-излъчващи радионуклиди. Изложен е накратко методът на тройните към двойните съвпадения (Triple-to-double coincidence ratio method, TDCR) в течно-сцинтиляционното броене, чрез който се определя по абсолютен начин активността на измервания радионуклид. Направено е сравнение с френския първичен TDCR еталон за измерване на активност по абсолютно определяне на активността на ^3H , ^{14}C , ^{63}Ni и ^{241}Am и е наблюдавано отлично съвпадение на резултатите в рамките на оценените неопределености. Това изследване показва, че разработената система има качества на метрологичен инструмент от най-високо ниво. Доколкото ни е известно, това е първата работеща система за абсолютно измерване на активност в България.

Krasimir Mitev, Chavdar Dutsov. DEVELOPMENT OF A TDCR COUNTING SYSTEM FOR ABSOLUTE ACTIVITY MEASUREMENTS AT THE FACULTY OF PHYSICS, SOFIA UNIVERSITY “ST. KLIMENT OHRIDSKI”

This work presents a TDCR counting system developed for absolute activity measurements of alpha- and beta-emitting radionuclides. The application of the TDCR method in liquid scintillation count-

За контакти: Красимир Митев, Катедра „Атомна физика“, Физически факултет, Софийски университет „Св. Климент Охридски“, бул. Джеймс Баучер 5, 1164 София, тел.: 359 2 8161 292, E-mail: kmitev@phys.uni-sofia.bg

ing is briefly discussed. The developed system is compared with the French primary TDCR system in absolute activity measurements of ^3H , ^{14}C , ^{63}Ni and ^{241}Am and an excellent agreement within the estimated uncertainties is found. The study shows that the developed TDCR system is a top grade metrological instrument. As far as we know, this is the first system for absolute activity measurement in Bulgaria.

Keywords: radionuclide metrology, TDCR counting, liquid scintillation counting
PACS numbers: 06.20.-f, 06.20.fb

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Течно-сцинтилационното броене е основен метод за измерване на активността на α - и β -излъчващи радионуклиди и се използва широко в метрологичните лаборатории по света. За оценка на активността на радионуклиди обикновено се прилага сравнителен подход, при който течно-сцинтилационните броячи се калибрират със сертифициран източник с прецизно известна активност. Сертифицирането на източниците, използвани за калибриране при течно-сцинтилационните измервания, по правило се осъществява чрез абсолютни методи, които се основават на пряко (първично, абсолютно) измерване (определяне) на измеряемата величина. Абсолютните методи са най-високото ниво във веригата на проследимост в метрологичното осигуряване и чрез тях се задават първичните еталони за активност на радиоактивни източници. За разлика от сравнителните методи, при абсолютните методи не се използва сравнителния подход, те се базират на фундаментално познаване на процеса на измерването и протичащите физични процеси. При абсолютните методи оценката на активността се получава на базата на точен физико-математичен модел, описващ процеса на абсолютното измерване.

Един първичен метод за абсолютно определяне на активността на течно-сцинтилационни източници е този на тройните към двойните съвпадения (Triple-to-double coincidence ratio method, TDCR), работещ на основата на статистическо описание на излъчването и регистрирането на светлината от течно-сцинтилационния коктейл [1]. TDCR методът е широко използван от националните метрологични институти за сертифициране на източници [2]. В последното десетилетие беше показано, че е възможно да се разработят миниатюрни TDCR детектори, които да имат метрологични характеристики, близки до тези на първичните TDCR детектори, използвани в националните метрологични институти [3]. Това разкрива възможности за разработване и използване на първични TDCR детектори на място в изследователските лаборатории, с което се постига съществено намаляване на усилията и подобряване на качеството на метрологичното осигуряване.

Наскоро във Физическия факултет на Софийския университет беше разработена съвременна детекторна система за абсолютно измерване на актив-

ност по TDCR метода [4]. Системата, наричана TDCR-SU (от TDCR – Sofia University), е компактна, преносима и в същото време напълно функционална TDCR система. Състои се от детекторно тяло, съдържащо оптична камера с три фотоелектронни умножителя (ФЕУ), и специализиран електронен модул за TDCR измервания. Работата на TDCR-SU детектора и неговите метрологични характеристики бяха изследвани чрез сравнение с първичния TDCR детектор на френската първична метрологична лаборатория Laboratoire National Henry Becquerel (LNHB). Резултатите от сравнението показват, че оценените активности на ^3H , ^{14}C и ^{241}Am с двете системи се съгласуват отлично в рамките на декларираните неопределености.

2. МЕТОД НА ТРОЙНИТЕ КЪМ ДВОЙНИТЕ СЪВПАДЕНИЯ (TDCR МЕТОД)

2.1. ОЦЕНКА НА ЕФЕКТИВНОСТТА ЗА РЕГИСТРАЦИЯ НА ТЕЧНО-СЦИНТИЛАЦИОНЕН ДЕТЕКТОР

Ефективността за регистрация на високоенергетични β - и α -източници в течно-сцинтилационните измервания може да бъде приета за 100% за почти всички практически приложения [5]. В случая на нискоенергийни β -източници и някои радионуклиди, разпадащи се с електронно залавяне (ЕС), ефективността за регистрация е по-ниска от 100% и е възможно да варира при различни условия на измерване. За точни и абсолютни измервания на активността на един радиоактивен източник трябва да знаем ефективността за регистрация с много висока точност. Тя може да бъде оценена чрез измерване с TDCR брояч и прилагане на теоретичен модел, базиран на статистическото описание на процесите, протичащи в брояча.

2.2. МОДЕЛ НА СВОБОДНИЯ ПАРАМЕТЪР

Ако при радиоактивно разпадане на дадено ядро от него се излъчи β - частица, то тя ще отдаде някакво количество енергия E в течно-сцинтилационния коктейл. Част от тази енергия ще отиде за излъчване на светлинни фотони от коктейла, като техният среден брой може да бъде изразен с [2]

$$N = \frac{\eta_0 Q(E) E}{h\nu}, \quad (1)$$

където $h\nu$ е средната енергия на фотоните и η_0 е абсолютната сцинтилационна ефективност. Функцията $Q(E)$ отразява нелинейната зависимост между броя излъчени от коктейла фотони и началната енергия на електрона. Тази

нелинейност се поражда от йонизационното гасене в течно-сцинтилационния коктейл, което се проявява, когато специфичните енергетични загуби (dE/dx) на частицата са големи. Функцията на йонизационното гасене се описва от полумпиричния закон на Birks [6] и се задава с уравнението

$$Q(E) = \frac{1}{E} \int_0^E \frac{dE}{1 + kB(dE/dx)}. \quad (2)$$

Тук kB е константа на Birks [6]. Ако приемем, че излъчените фотони имат поасоново разпределение със средна стойност N , то тогава средният брой фотони, достигащи до фотокатодите на фотоумножителите, n също е разпределен поасоново [2]:

$$p(n, \bar{n}) = \frac{\bar{n}^n}{n!} e^{-\bar{n}}, \quad (3)$$

където $\bar{n} = N\zeta$ е средният брой фотони, а ζ е геометричната ефективност за регистрация на фотоумножителя. Излъчването на n фотона от сцинтилатора води до избиването на m фотоелектрона от фотокатода, където m се изразява чрез

$$m = n\varepsilon_q\mu, \quad (4)$$

където ε_q е квантовата ефективност на фотоумножителя, а μ – фактор на спектралната чувствителност, отчитащ разликите между флуоресцентния спектър на сцинтилатора и абсорбционния спектър на фотокатода.

Средният брой фотоелектрони m , получени в едно ФЕУ при поглъщането на частица с енергия E в течно-сцинтилационния коктейл, може да бъде пресметнат от уравнения (1) и (4):

$$\bar{m} = N\varepsilon = \frac{L\xi\varepsilon_q\mu}{h\nu} Q(E)E = \frac{EQ(E)}{\lambda}, \quad (5)$$

където ε е пълната ефективност за регистрация на детектора, а λ е свободният параметър в модела и има смисъл на средната енергия, която е нужна, за да се създаде фотоелектрон на фотокатода на ФЕУ. Тъй като броят на избитите фотоелектрони m отново следва разпределението на Поасон [2], то вероятността за регистрация на частица, отдала енергия E в коктейла, в детектор с 3 ФЕУ е [2]

$$P(E, \lambda) = 1 - e^{-\bar{m}(E, \lambda)/3}. \quad (6)$$

Ефективността ε на течно-сцинтилационния брояч е функция на свободния параметър λ и зависи от вида на частицата. В случая на чисти β -източници ефективността е произведението на вероятността за регистрация на даден импулс и нормирания бета-спектр $S(E)$, интегриран по целия енергиен диапазон [2]:

$$\varepsilon(\lambda) = \int_0^{E_{max}} S(E)P(E, \lambda)dE, \quad (7)$$

където E_{max} е максималната енергия на β -частиците.

2.3. МЕТОД НА ТРОЙНИТЕ КЪМ ДВОЙНИТЕ СЪВПАДЕНИЯ

Методът на тройните към двойните съвпадения (TDCR) използва гореописания модел на свободния параметър за система, състояща се от три ФЕУ (условно A , B и C), които наблюдават дадена течно-сцинтилационна проба от три взаимно еднакви позиции. За прилагането на метода е нужна електронна система, която позволява регистриране на двойни съвпадения между детектираните импулси от всяка двойка ФЕУ (AB , BC и AC) и тройни съвпадения между трите ФЕУ (T). Логическата сума на двойните съвпадения (D) се дефинира като [2]

$$D = AV \vee BC \vee AC - AB + BC + AC - 2T,$$

където \vee е логическият оператор „или“. Тройните съвпадения се дефинират като $T = A \wedge B \wedge C$, където \wedge е логическият оператор „и“. Под съвпадение в случая се разбира пристигане на импулсите от различните детектори в рамките на предварително зададен малък интервал от време (разделително време).

Теоретичните ефективности за регистрация на тройно съвпадение и на логическата сума на двойни съвпадения могат да бъдат пресметнати от (7), замествайки $P(E, \lambda)$ със съответната вероятност за регистрация на даден импулс. При предположение за еднакви фотоумножители, съответните вероятности са

$$\varepsilon_2 = \int_0^{E_{max}} S(E) \left(1 - e^{-\bar{m}/3}\right)^2 dE,$$

за два ФЕУ в съвпадение и

$$\varepsilon_T = \int_0^{E_{max}} S(E) \left(1 - e^{-\bar{m}/3}\right)^3 dE,$$

за три ФЕУ в съвпадение в случай на идентични фотоумножители.

За голям брой детектирани събития отношението на скоростите на броене на тройните съвпадения към скоростите на броене на логическата сума на двойните съвпадения може да се пресметне като [2]

$$\frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_D} = \frac{\int_0^{E_{max}} S(E) \left(1 - e^{-EQ(E)/3\lambda}\right)^3 dE}{\int_0^{E_{max}} S(E) \left[3 \left(1 - e^{-EQ(E)/3\lambda}\right)^2 - 2 \left(1 - e^{-EQ(E)/3\lambda}\right)^3\right] dE}, \quad (8)$$

където $S(E)$ е нормализираният спектър на отдадената в течно-сцинтилационния коктейл енергия, която включва β -частици, фотоелектрони, както и комптънови, оже- и конверсионни електрони. $Q(E)$ е корекционният фактор на йонизационното гасене, E_{max} – максималната енергия на β -частиците, а λ – свободният параметър.

За голям брой регистрирани събития, отношението на скоростта на броене на тройните съвпадения към скоростта на броене на логическата сума на двойните съвпадения (T/D) клони към отношението на ефективностите за регистрация $\varepsilon_T/\varepsilon_D$ [2]. Лявата страна на уравнението за ефективността за регистрация на тройни съвпадения към ефективността за регистрация на двойни съвпадения може да бъде получена експериментално, а дясната страна на уравнението може да бъде пресметната теоретично, ако знаем $S(E)$ и стойността на параметъра kB в уравнение (2).

Уравнение (8) е валидно при предположение за идентични фотоумножители, но в реален TDCR брояч това предположение е трудно изпълнимо. В такъв случай се налага решаването на система от три уравнения [2]:

$$\begin{aligned} \frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_{AB}} &= \frac{\int_0^{E_{max}} S(E) \left(1 - e^{-EQ(E)/3\lambda_A}\right) \left(1 - e^{-EQ(E)/3\lambda_B}\right) \left(1 - e^{-EQ(E)/3\lambda_C}\right) dE}{\int_0^{E_{max}} S(E) \left(1 - e^{-EQ(E)/3\lambda_A}\right) \left(1 - e^{-EQ(E)/3\lambda_B}\right) dE}, \\ \frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_{BC}} &= \frac{\int_0^{E_{max}} S(E) \left(1 - e^{-EQ(E)/3\lambda_A}\right) \left(1 - e^{-EQ(E)/3\lambda_B}\right) \left(1 - e^{-EQ(E)/3\lambda_C}\right) dE}{\int_0^{E_{max}} S(E) \left(1 - e^{-EQ(E)/3\lambda_B}\right) \left(1 - e^{-EQ(E)/3\lambda_C}\right) dE}, \\ \frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_{AC}} &= \frac{\int_0^{E_{max}} S(E) \left(1 - e^{-EQ(E)/3\lambda_A}\right) \left(1 - e^{-EQ(E)/3\lambda_B}\right) \left(1 - e^{-EQ(E)/3\lambda_C}\right) dE}{\int_0^{E_{max}} S(E) \left(1 - e^{-EQ(E)/3\lambda_A}\right) \left(1 - e^{-EQ(E)/3\lambda_C}\right) dE}, \end{aligned} \quad (9)$$

където λ_A/λ_B и λ_C са свободните параметри за всяко ФЕУ. Подобно на ситуацията с идентични ФЕУ, в този случай експерименталните отношения T/AB ,

T/BC и T/AC клонят към отношението на теоретичните ефективности за регистрация $\varepsilon_T/\varepsilon_{AB}$, $\varepsilon_T/\varepsilon_{BC}$ и $\varepsilon_T/\varepsilon_{AC}$ при голям брой регистрирани събития. Стойностите на свободните параметри в горните уравнения могат да бъдат намерени с помощта на подходящ оптимизационен алгоритъм (напр. в [7] е използван „Downhill Simplex“), като функцията, която се минимизира, е квадратичната сума на разликите между теоретичните и експерименталните отношения [2]:

$$\Delta = \left(\frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_{AB}} - \frac{T}{AB} \right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_{BC}} - \frac{T}{BC} \right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_{AC}} - \frac{T}{AC} \right)^2. \quad (10)$$

Чрез минимизиране на горния функционал може се получат стойностите на свободните параметри (λ_A/λ_B и λ_C) за дадена стойност на параметъра kB . Активността A на измерваната проба може да бъде пресметната, използвайки определената ефективност за регистрация и скоростта на броене на логическата сума на двойните съвпадения D :

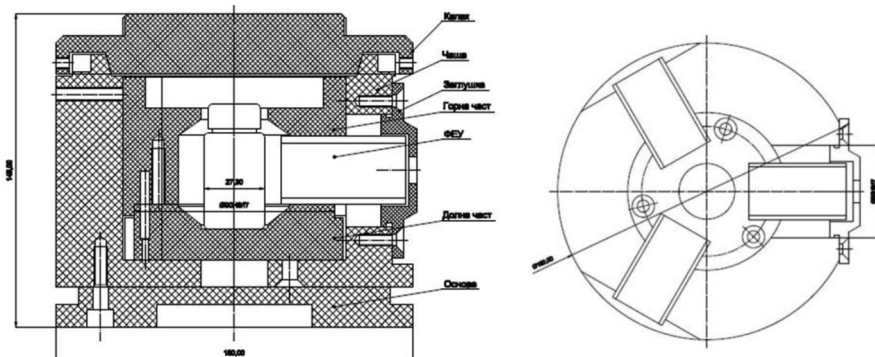
$$A = \frac{D}{\varepsilon_D(kB, \lambda_A, \lambda_B, \lambda_C)}. \quad (11)$$

Ефективностите за регистрация, пресметнати с TDCR модела, зависят от избора на параметъра kB , който е единственият външен за модела параметър. За високо енергетични β -емитери (над няколко стотин keV), влиянието на стойността на kB е пренебрежимо [2].

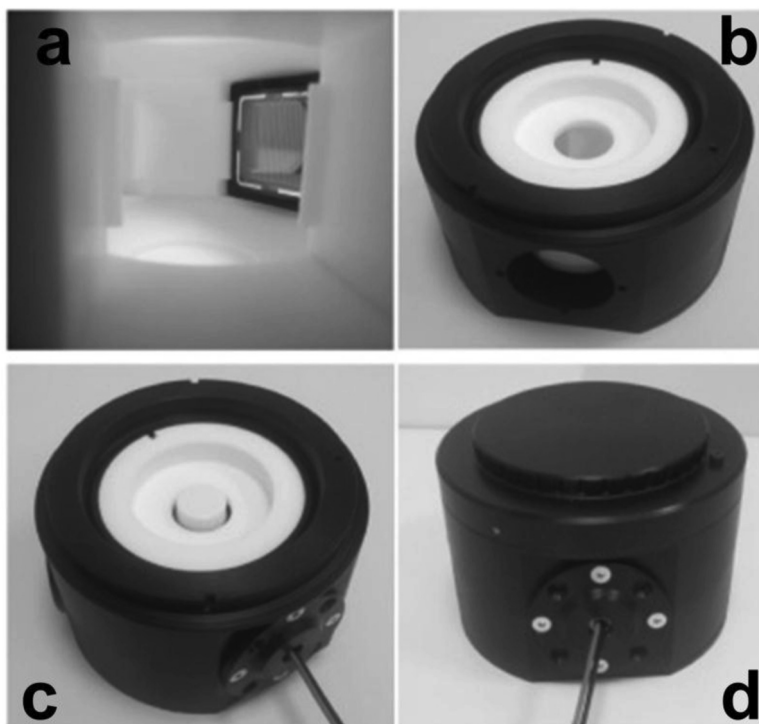
3. РАЗРАБОТКА И ВАЛИДИРАНЕ НА TDCR-SU ДЕТЕКТОРНА СИСТЕМА

3.1. ДИЗАЙН НА TDCR-SU ДЕТЕКТОР

Наскоро във Физическия факултет на Софийския университет беше разработен TDCR брояч, който дава възможност за провеждане на първични измервания на активност на течно-сцинтилационни проби чрез прилагането на метода на тройните към двойните съвпадения. Броячът, наричан TDCR-SU, е компактен и преносим детектор и се състои от оптична камера, фотоелектронни умножители тип Hamamatsu R7600U-200 и преброителен модул nanoTDCR, разработен от компанията labZY, САЩ. Принципът на действие на nanoTDCR е описан в [8]. На фиг. 1. е показан конструктивен чертеж на детектора.



Фиг. 1. Схема на детектора



Фиг. 2. Елементи на TDCR-SU детектора: а) оптична камера с монтирано в нея ФЕУ; б) оптичната камера е вложена във външното тяло; в) с поставено течно-сцинтилационно шише в оптичната камера; д) в затворено работно положение



Фиг. 3. Снимка на детекторната система TDCR-SU. За мащаб в центъра са поставени две стандартни 20-милилитрови течно-сцинтилационни шишета

На фиг. 2 са показани елементите, от които е изграден TDCR-SU детекторът и етапи от процеса на сглобяването му. На фиг. 3 е показана цялата преносима система в напълно функционален вид. Трябва да се отбележи, че дизайнът на оптичната камера и използваните ФЕУ са заимствани от подобна разработка в италианската метрологична лаборатория ENEA [9], като дизайнът на оптичната камера е преработен така, че ФЕУ-тата да са отдалечени на около 7 mm от пробата и да имат видимост върху целия ѝ обем. Проектирането, конструктивната разработка и механичната изработка са направени в България.

3.2. ВАЛИДИРАНЕ НА РАБОТАТА НА TDCR-SU ДЕТЕКТОРА

Първата експериментална оценка на работата на TDCR-SU детектора беше проведена чрез сравнение с първичния TDCR брояч (RCDT1) на френската първична метрологична лаборатория (Laboratoire National Henri Becquerel (LNHB)). Детекторът RCDT1 е добре установена система за TDCR измервания, използвана от десетилетия за първични измервания на активност и стандартизиране на радионуклиди. В основата му стои широко използваният и доказал се във времето преброятелен модул MAC3 [10]. За целите на провеждане на сравнението TDCR-SU системата беше занесена и инсталирана във френската лаборатория LNHB.

Сравнението между TDCR-SU и RCDT1 беше проведено чрез измервания на източници ^3H , ^{14}C , ^{63}Ni и ^{241}Am . Направени бяха 10 минутни измервания на четири източника ^{241}Am както на TDCR-SU, така и на RCDT1. Резултатите от сравнението са представени в [4] и показани в табл. 1. Разликата Δ между

чистата (коригирана за фон) скорост на броене n_0 между двата детектора е пресметната като

$$\Delta = \frac{n_0^{TDCR-SU}}{n_0^{RCTD1}} - 1$$

и е под 0.30% за всички измервания. При проведеното сравнение се наблюдава линеен отклик на TDCR-SU детектора за скорости на броене в диапазона 480–4600 s⁻¹.

Таблица 1. Сравнение между RCTD1 и TDCR-SU, използвайки четири ²⁴¹Am източника с различна активност. Показаните в таблицата скорости на броене са чистите скорости на броене след изваждане на фоново измерване

²⁴¹ Am проба	Логическа сума на двойни съвпадения (<i>D</i>) [s ⁻¹]			Тройни съвпадения (<i>T</i>) [s ⁻¹]			TDCR		
	RCTD1	TDCR-SU	Δ [%]	RCTD1	TDCR-SU	Δ [%]	RCTD1	TDCR-SU	Δ [%]
No. 1	487	486.4	0.12	487	486.1	0.18	1.000	0.9994	0.06
No. 2	1513	1515.2	-0.15	1513	1514.1	-0.07	1.000	0.9993	0.07
No. 3	2553	2559.5	-0.25	2554	2557.6	-0.14	1.004	0.9992	0.11
No. 4	4600	4591.2	0.19	4601	4588.0	0.28	1.002	0.9993	0.09

Двата детектора, RCTD1 и TDCR-SU, бяха сравнени и чрез измервания на активност на три чисти β-лъчителя, ³H, ¹⁴C и ⁶³Ni. Източниците бяха измерени последователно на RCTD1 и TDCR-SU. Активностите на източниците са пресметнати чрез прилагането на TDCR модела за детектор с три неидентични ФЕУ, като за прилагането на модела е използвана програмата TDCR07c, разработена в LNHB [11]. За пресмятането на активността са използвани еднакви данни за използвания коктейл, както и за стойността на параметъра *kB*. Пресметнатите активности са показани в табл. 2. Двете детекторни системи са в отлично съвпадение за източниците ³H и ¹⁴C. Разликата в случая на ⁶³Ni най-вероятно се дължи на твърде кратко измерване или неволно засветяване на фотоумножителите преди измерването. Пресметнатите активности за ⁶³Ni се съгласуват напълно, ако се вземат предвид разширените неопределености (*k* = 2).

Таблица 2. Сравнение между RCTD1 и TDCR-SU по определяне на активност на ³H, ¹⁴C и ⁶³Ni. Подробности за това сравнение са публикувани в [4]

Проба	Активност, Bq (RCTD1, LNHB)	Активност, Bq (TDCR-SU)	Δ [%]
³ H, толуенов коктейл	1010.7 (2.1) [0.21%]	1010.9 (5.1) [0.50%]	-0.02%
¹⁴ C, толуенов коктейл	1728 (2.4) [0.14%]	1731.3 (4.7) [0.27%]	-0.18%
⁶³ Ni, UltimaGold AB LSC	1325.9 (4.1) [0.31%]	1313.9 (4.9) [0.37%]	0.91%

3.2. ВАЛИДИРАНЕ НА TDCR-SU ДЕТЕКТОР ВЪВ ФЗФ НА СУ

След сравнението в LNHB TDCR-SU детекторът беше върнат и инсталиран във Физическия факултет на Софийския университет. След инсталацията и настройването на детектора с него бяха измерени 2 течно-сцинтилационни източника (^3H и ^{14}C в органични течно-сцинтилационни коктейли), които са сертифицирани от LNHB. В табл. 3 е представено сравнение на сертифицираните активности с тези, получени при измерванията с TDCR-SU във Физическия факултет. Разликите между оценените с TDCR-SU и сертифицираните активности не надхвърлят 0.3% и са напълно в рамките на оценените неопределености.

Таблица 2. Сравнение между активности на източници ^3H и ^{14}C , определени с TDCR-SU и техните активности, сертифицирани от LNHB

Проба	Активност, Bq (RCTD1, LNHB)	Активност, Bq (TDCR-SU, Sofia)	Δ [%]
^3H , толуенов коктейл	938 (5) [0.5%]	941 (12) [1.3%]	-0.3%
^{14}C , толуенов коктейл	543.9(1.1) [0.2%]	544.15 (84) [0.15%]	-0.05%

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Във Физическия факултет на Софийския университет „Св. Климент Охридски“ е създадена система за абсолютно измерване на активност на алфа- и бета-източници посредством метода на тройните към двойните съвпадения. Качеството и възможностите на разработената система са проверени чрез сравнения с първичния еталон на френския национален метрологичен институт по измерване на активност на ^3H , ^{14}C , ^{63}Ni и ^{241}Am . Резултатите от сравненията показват, че разработената система има отлични метрологични характеристики и може да служи като първичен еталон за активност.

Благодарности. Авторите изказват своята голяма благодарност на д-р Philippe Cassette от LNHB за съветите, съдействието и подкрепата при всички етапи на настоящата работа. Без неговата подкрепа тази разработка нямаше да може да се осъществи. Изказваме благодарност на колектива на компанията labZY, и в частност на д-р Валентин Йорданов, за създаването на nanoTDCR и за съветите и съдействието при работата с устройството. Изказваме голяма благодарност на г-н Николай Марков и г-н Тодор Тодоров за тяхното търпение, усилия и работа по конструктивната и механичната изработка на детектора.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] L'Annunziata, M. Handbook of Radioactivity Analysis. Amsterdam, The Netherlands: Academic Press, Elsevier., third ed., 2012.
- [2] Broda. R., Cassette, P., Kossert, K. *Metrologia*, **44**, 2007, S36.
- [3] Cassette, P., et al. Development of portable liquid scintillation counters for on-site primary measurement of radionuclides using the triple-to-double coincidence ratio method. In: Proceedings of the 3rd International Conference on Advancements in Nuclear Instrumentation, Measurement Methods and their Applications (ANIMMA), Marseille, 2013, doi 10.1109/ANIMMA.2013.6727876.
- [4] Mitev, K., Cassette, P., Jordanov, V., Liu H.R., Dutsov, C. *J. Radioanal. Nulc. Ch.*, **314**, 2017, 583.
- [5] Cassette, P., et. al. *Appl. Radiat. Isotopes*, **52**, 2000, 643.
- [6] Birks, J. The Theory and Practice of Scintillation Counting. Oxford: Pergamon Press, 1964.
- [7] Broda, R. *Appl. Radiat. Isotopes*, **58**, 2003, 585.
- [8] Jordanov, V., Cassette. P., Dutsov, Ch., Mitev, K. Development and applications of miniature TDCR acquisition system for radionuclide metrology, *Nucl. Instrum. Meth. A*, in press
- [9] Capogni, M., De Felice, P. *Appl. Radiat. Isotopes*, **93**, 2014, 45
- [10] Bouchard. J., Cassette, P. *Appl. Radiat. Isotopes*, **52**, 2000, 669.