

Государственный первичный эталон единиц объёмной активности радиоактивных аэрозолей, радона, торона и плотности потока радона ГЭТ 39-2021

Сергей Геннадьевич Бирюков¹, Олег Иванович Коваленко^{2✉}, Александр Алексеевич Орлов³

^{1, 2, 3} Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, г. п. Менделеево, Московская область, Россия

¹sgbir@vniiftri.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8592-6966>

²koi@vniiftri.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0003-2139-9287>

³orlov_aa@vniiftri.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3802-6973>

Аннотация. Представлен состав Государственного первичного эталона единиц объёмной активности радиоактивных аэрозолей, радона, торона и плотности потока радона ГЭТ 39-2021. Описаны методы воспроизведения и передачи единиц объёмной активности радиоактивных аэрозолей, радона, торона и плотности потока радона. Указаны возможные источники погрешности, произведена их количественная оценка, приведены метрологические характеристики ГЭТ 39-2021. ГЭТ 39-2021 обеспечивает единство измерений объёмной активности радиоактивных аэрозолей, радона, торона и плотности потока радона в различных сферах деятельности – в атомной отрасли, на предприятиях по добыче и переработке ядерного сырья и материалов и др. В атомной промышленности ГЭТ 39-2021 служит для обеспечения радиационной безопасности персонала на объектах использования атомной энергии и окружающей среды при создании и введении в эксплуатацию ядерных реакторов нового поколения.

Ключевые слова: объёмная активность, плотность потока, искусственные радиоактивные аэрозоли, природные радиоактивные аэрозоли, радон, торон, барботирование (барботаж), барботёр

Для цитирования: Бирюков С. Г., Коваленко О. И., Орлов А. А. Государственный первичный эталон единиц объёмной активности радиоактивных аэрозолей, радона, торона и плотности потока радона ГЭТ 39-2021 // Измерительная техника. 2022. № 8. С. 3–8. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-8-3-8>

State primary standard of units of volumetric activity of radioactive aerosols, radon, thoron and radon flux density GET 39-2021

Sergey G. Biryukov¹, Oleg I. Kovalenko^{2✉}, Alexandr A. Orlov³

^{1, 2, 3} Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radio Engineering, Mendeleev, Moscow region, Russia

¹sgbir@vniiftri.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8592-6966>

²koi@vniiftri.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0003-2139-9287>

³orlov_aa@vniiftri.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3802-6973>

Abstract. The composition of the State primary standard of units of volumetric activity of radioactive aerosols, radon, thoron and radon flux density GET 39-2021 is presented. Methods for reproduction and transmission of volumetric activity units of radioactive aerosols, radon, thoron and radon flux density are described. Possible sources of error are indicated, their quantitative assessment is made, metrological characteristics of GET 39-2021 are given. GET 39-2021 ensures the uniformity of measurements of the volumetric activity of radioactive aerosols, radon, thoron and radon flux density in various fields of activity in the nuclear industry, at enterprises for the production and processing of nuclear raw materials and materials, etc. In the nuclear industry, GET 39-2021 serves to ensure radiation safety of personnel at nuclear facilities and the environment during the creation and commissioning of new generation nuclear reactors.

Keywords: volumetric activity, flux density, artificial radioactive aerosols, natural radioactive aerosols, radon, thoron, bubbling

Введение. В Российской Федерации постоянно и на системной основе активно развиваются атомная энергетика и деятельность в области использования атомной энергии. Это требует обеспечения надлежащего контроля

за радиационной безопасностью населения, окружающей среды и персонала атомных электростанций, в частности контроля за газоаэрозольными выбросами при работе реакторов [1].

Радиоактивными аэрозолями называют дисперсные системы с радиоактивной твёрдой или жидкой дисперсной фазой и газообразной дисперсионной средой. Радиоактивные аэрозоли подразделяют на искусственные и природные.

Искусственные радиоактивные аэрозоли образуются в результате деятельности объектов ядерно-энергетического комплекса, предприятий по добыче и переработке радиоактивного сырья, по переработке и хранению отходов ядерного топлива и радиационно-опасных объектов, научно-исследовательских институтов и других организаций с исследовательскими ядерными установками и ядерно-физическими установками, а также в результате техногенных аварий на вышеперечисленных объектах и техногенных воздействий человека на природу.

Природные радиоактивные аэрозоли образуются в результате естественных природных процессов. Природные радиоактивные аэрозоли – это в основном дочерние продукты распада изотопов радона ^{222}Rn (радон) и ^{220}Rn (торон).

Дисперсная фаза радиоактивного аэрозоля содержит атомы радиоактивных элементов, излучение которых представляет опасность для здоровья человека. Основную опасность радиоактивный аэрозоль представляет при попадании в организм человека через органы дыхания с вдыхаемым воздухом, происходит внутреннее облучение организма осевшими в лёгких радиоактивными частицами [2, 3]. Для оценки степени опасности используется величина – объёмная активность $[\text{Бк}\cdot\text{м}^{-3}]$, значение которой представляет собой активность $[\text{Бк}]$ дисперсной фазы радиоактивного аэрозоля в единице объёма дисперсионной среды $[\text{м}^3]$.

Для оценки потенциальной радоноопасности земельных участков под строительство жилых, общественных и производственных зданий¹ необходимо измерение плотности потока радона с поверхности грунта. Для этого вводят величину – плотность потока радона $[\text{мБк}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}]$, значение которой представляет собой активность $[\text{Бк}]$ радона, проходящего через единицу площади $[\text{м}^2]$ в единицу времени $[\text{с}]$.

Большая часть измерений объёмной активности радиоактивных аэрозолей радона, торона и плотности потока радона необходима для оценки радиационной опасности для человека [4, 5]. Поэтому обеспечение единства измерений в этой области представляет важную государственную задачу. Основными потребителями данного вида измерений являются организации, предприятия и объекты, работающие в области использования атомной энергии: атомные станции, предприятия по добыче и переработке сырья и материалов, предприятия, эксплуатирующие ядерно-физические установки, в том числе научно-исследовательские институты.

Общее количество средств измерений объёмной активности радиоактивных аэрозолей велико. Такие средства

измерений применяют в системах радиационного контроля группами по несколько десятков на каждый энергоблок атомной электростанции. На каждой атомной электростанции находится несколько энергоблоков, хранилища отработанного топлива и другие помещения и здания, радиационная обстановка которых постоянно контролируется. Таким образом, общее количество средств измерений только на одной атомной электростанции составляет более 2000 шт.

Высшим звеном системы обеспечения единства измерений единиц объёмной активности радиоактивных аэрозолей, радона, торона и плотности потока радона является Государственный первичный эталон единиц объёмной активности радиоактивных аэрозолей, радона, торона и плотности потока радона ГЭТ 39-2021².

Состав эталона, назначение и принципы работы составных частей. До 2021 года Государственный первичный эталон единицы объёмной активности радиоактивных аэрозолей ГЭТ 39-2014 включал в свой состав [6, 7]: систему подготовки газовой среды для генераторов искусственных радиоактивных аэрозолей; генераторы искусственных радиоактивных аэрозолей; систему отбора проб дисперсной фазы искусственных радиоактивных аэрозолей (система управления генераторами искусственных радиоактивных аэрозолей); систему подготовки газовой среды для генератора парообразного йода-131 (шкаф генератора парообразного йода-131); генератор парообразного йода-131; систему отбора проб парообразного йода-131 (система управления генератором парообразного йода-131); радиометры (спектрометры) альфа-, бета- и гамма-излучений; большую радоновую камеру РК-2007.

Система подготовки газовой среды для генератора искусственных радиоактивных аэрозолей предназначена для формирования газовых потоков и измерения их параметров (объёмного расхода и объёма) по каналам «разбавление», «барботирование», «смешивание» для генераторов радиоактивных аэрозолей.

Генераторы искусственных радиоактивных аэрозолей предназначены для создания радиоактивного аэрозоля с жидкой дисперсной фазой.

Принцип работы генераторов основан на барботировании чистого воздуха через раствор соли радионуклида соответствующего типа (^{239}Pu – альфа-излучатель, $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ – бета-излучатель). Неактивным носителем в указанном растворе служит хлористый натрий (или азотно-кислый аммоний).

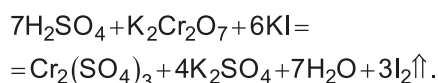
Аэрозоли образуются следующим образом: при диспергировании раствора сильной струёй воздуха на выходе из отверстия сопла барботёра образовавшиеся пузырьки воздуха поднимаются на поверхность раствора и под действием сил поверхностного натяжения рвутся с образованием мельчайших капелек. Далее в печи-сушке эти капельки высушиваются с образованием твёрдых аэрозольных частиц с атомами радионуклида соответствующего типа.

¹ МУ 2.6.1.038-2015. Оценка потенциальной радоноопасности земельных участков под строительство жилых, общественных и производственных зданий.

² Приказ Росстандарта № 87 от 05 февраля 2021 г. «Об утверждении Государственного первичного эталона единиц объёмной активности радиоактивных аэрозолей, радона, торона и плотности потока радона».

Система отбора проб дисперсной фазы искусственного радиоактивного аэрозоля обеспечивает воспроизведение единицы объёмной активности радиоактивных аэрозолей и передачу её средствам измерений.

Система подготовки газовой среды для генератора парообразного йода-131 предназначена для формирования газовых потоков и измерения их параметров (объёмного расхода и объёма) по каналам «разбавление» «генерация» для генераторов парообразного йода-131. Генераторы парообразного йода-131 предназначены для создания парообразного йода-131. Принцип работы генераторов основан на химической реакции взаимодействия KI и бихромата калия, в результате которой образуется парообразный йод-131:



Полученный таким образом йод-131 затем подают через блоки предварительного и окончательного разбавления в систему отбора проб.

Система отбора проб йода-131 аналогична системе отбора проб для искусственных радиоактивных аэрозолей. Единственное отличие – типы используемых эталонных фильтров. Для йода используют фильтры на основе угольного наполнителя.

Большая радоновая камера РК-2007 представляет собой герметичную камеру объёмом 17 м³, оборудованную 3D-манипулятором с площадкой, которая предназначена для установки средств измерений или контрольно-измерительных приборов. 3D-манипулятор позволяет переместить площадку практически в любую точку внутри камеры. Для воспроизведения объёмной активности естественных радиоактивных аэрозолей в пространстве РК-2007 служит генератор радона.

В ГЭТ 39-2021 введён комплекс аппаратуры воспроизведения и передачи единиц объёмной активности радона, торона и плотности потока радона, в состав которого входят: установка для воспроизведения единицы объёмной активности радона УОАР; установка для воспроизведения объёмной активности торона УОАТ; установка для воспроизведения плотности потока радона УППР; барботёр в геометрии сосуда Маринелли; ячейки барботаж; гамма-спектрометрический программно-аппаратный комплекс типа Эко ПАК-03-3; измерительный комплекс типа Альфаград Плюс; радиоспектрометрические фильтры типа АФА-РСП.

Состав *установки для воспроизведения единицы объёмной активности радона УОАР*: референтная ёмкость объёмом 0,1 м³; радиометр радона эталонный типа AlphaGUARD DF2000M; вакуумный насос и цифровой датчик давления (преобразователь давления).

Референтная ёмкость предназначена для создания в ней радоновой атмосферы методом барботирования раствора ²²⁶Ra, находящегося в барботёре (ячейке барботаж), и последующего перевода ²²²Rn в референтную ёмкость.

Предварительно раствор ²²⁶Ra в ячейке барботаж выдерживается в течение времени установления радиоактивного

равновесия между ²²⁶Ra и ²²²Rn, примерно соответствующего 10 периодам полураспада ²²²Rn ($T_{1/2}(\text{^{222}Rn})=3,8235$ суток), что составляет около 40 суток.

Перевод ²²²Rn в референтную ёмкость осуществляется следующим образом. С помощью вакуумного насоса через пакет фильтров в референтной ёмкости создают небольшое разрежение, за счёт которого ²²²Rn из барботёра (ячейки барботаж) переводят в референтную ёмкость. Время перевода в референтную ёмкость 99,9 % ²²²Rn, накопленного в барботёре (ячейке барботаж), составляет не менее 10 мин.

Объёмная активность ²²²Rn в референтной ёмкости измеряется радиометром радона AlphaGUARD. Радиометр может находиться как в референтной ёмкости, так и вне её, и через устройство ввода/вывода подключается к персональному компьютеру. С помощью входящей в комплект радиометра программы считывается объёмная активность ²²²Rn в любой момент времени, а также контролируются параметры микроклимата (температура, влажность, давление) в референтной ёмкости.

В состав *установки для воспроизведения единицы объёмной активности торона* входят: герметичные боксы для эманации тория и генерации торона; источник торона; микронагнетатель; цифровые регуляторы расхода типа EL-FLOW; тороновая линейка.

Герметичный бокс с источником тория предназначен для создания в нём тороновой атмосферы методом эманирования ²²⁰Rn из источника тория. Накапливаемый в герметичном боксе ²²⁰Rn прокачивается из него в накопительную камеру через тороновую линейку микронагнетателем. Объёмная скорость прокачивания регулируется и измеряется цифровым регулятором расхода EL-FLOW. Объёмную активность ²²⁰Rn в накопительной камере измеряют с помощью измерительного комплекса «Альфаград Плюс», который также контролирует параметры микроклимата (температура, влажность, давление) в накопительной камере.

В состав *установки для воспроизведения единицы плотности потока радона* входят: референтная ёмкость объёмом 0,1 м³ с трубой, наполненной имитантом грунта; накопительные камеры разного объёма; вакуумный насос; преобразователь давления (цифровой датчик давления).

Референтная ёмкость предназначена для создания в ней радоновой атмосферы как методом барботирования раствора ²²⁶Ra, находящегося в барботёре (ячейке барботаж), и последующего перевода ²²²Rn в референтную ёмкость, так и методом эманирования ²²²Rn из твёрдого источника с радионуклидом ²²⁶Ra.

Метод воспроизведения объёмной активности радона. Радон ²²²Rn представляет собой инертный радиоактивный газ с периодом полураспада 3,8235 дня [8]. Радон является дочерним продуктом распада ²²⁶Ra.

Метод воспроизведения единицы объёмной активности радона основан на его накоплении в барботере в течение не менее десяти периодов полураспада (40 суток) и переводе всего накопленного радона в ёмкость объёмом $V=(0,1000\pm0,0001)$ м³ [9]. При этом активность накопленного

радона $A(^{222}\text{Rn})$ с погрешностью не более 0,5 % равна активности материнского радионуклида ^{226}Ra . Активность радионуклида ^{226}Ra измеряется на гамма-спектрометре с детектором из особо чистого германия.

Таблица 1

Бюджет неопределённости измерений при воспроизведении единицы объёмной активности радона и торона

Источники погрешности и неопределённости	^{222}Rn		^{220}Rn	
	θ_i , %	u_A , %	θ_i , %	u_B , %
Приборная погрешность при измерении активности	3,0	1,7	3,0	1,7
Неточность определения объёма накопительной ёмкости	0,05	0,029	0,05	0,029
Эффективность перевода в накопительную ёмкость	0,2	0,115	0,2	0,115
Длительность измерений	0,01	0,006	0,01	0,006
Неточность знания постоянной распада	0,02	0,012	0,2	0,115

Таблица 2

Составляющие погрешности и неопределённости результатов измерений при воспроизведении единицы плотности потока радона

Источники погрешности и неопределённости	θ_i , %	u_B , %
Приборная погрешность	4,4	2,5
Неточность определения объёма накопительной камеры	0,5	0,3
Неточность определения площади поверхности эманирования	0,5	0,3
Неточность знания постоянной распада	0,02	0,01
Время экспонирования	0,1	0,06

Метрологические характеристики ГЭТ 39-2021

Метрологические характеристики	Значения
Диапазон воспроизведения объёмной активности, Бк/м ³ :	
искусственных радиоактивных аэрозолей	$7 \cdot 10^{-3} - 4 \cdot 10^3$
природных радиоактивных аэрозолей	$70 - 4 \cdot 10^5$
парообразного I-131	$7 - 4 \cdot 10^6$
радона	$10 - 10^5$
торона	$10 - 10^5$
Диапазон воспроизведения плотности потока радона, мБк·м ⁻² ·с ⁻¹	$30 - 10^6$
СКО воспроизведения объёмной активности радиоактивных аэрозолей, парообразного I-131, радона, торона, %	2
НСП воспроизведения объёмной активности радиоактивных аэрозолей, парообразного I-131, радона, торона, %	5
СКО воспроизведения плотности потока радона, %	4
НСП воспроизведения плотности потока радона, %	7

Объёмная активность радона в ёмкости определяется по формуле

$$Q_V(^{222}\text{Rn}) = e^{-\lambda_{\text{Rn}} t} \alpha A(^{222}\text{Rn}) / V,$$

где α – эффективность перевода радона в ёмкость; λ_{Rn} – постоянная распада радона; t – время, прошедшее с момента окончания перевода радона в ёмкость.

Метод воспроизведения объёмной активности торона. Торон ^{220}Rn представляет собой инертный радиоактивный газ с периодом полураспада 55,6 с. Торон является дочерним продуктом распада ^{224}Ra .

Метод воспроизведения единицы объёмной активности торона основан на накоплении торона в герметичной ёмкости объёмом $V = (5,000 \pm 0,025) \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$ [9] в течение не менее десяти его периодов полураспада (1 мин). При этом активность накопленного торона $A(^{220}\text{Rn})$ с погрешностью не более 0,5 % равна активности материнского радионуклида ^{224}Ra , находящегося в радиоактивном равновесии с ^{232}Th . Измерение активности радионуклида ^{224}Ra выполняется на гамма-спектрометре с детектором из особо чистого германия.

Объёмная активность торона ^{220}Rn определяются по формуле

$$Q_{\text{Tn}} V = A_{\text{Ra}}(0) e^{-\lambda_{\text{Rn}} t} \alpha_2 / V,$$

где α_2 – эффективность перевода торона в линейку; V – объём герметичного бокса; λ_{Rn} – постоянная распада ^{220}Rn ; t – время накопления ^{220}Rn в герметичном боксе.

Составляющие погрешности и неопределённости результатов измерений при воспроизведении единицы объёмной активности радона и торона представлены формулами и в табл. 1:

$$S_0 = 1,8 \%; \theta_0 = 1,4 \left[\sum \theta_i^2 \right]^{1/2} = 4,2 \%;$$

$$u_A = 1,8 \%; u_B = 1,74 \%;$$

Таблица 3

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + \sum_i u_{Bi}^2} = 2,5 \%; U_p = 2u_c = 5,0 \%,$$

где S_0 – среднее квадратическое отклонение (СКО) результата измерений при воспроизведении единицы (случайная составляющая погрешности измерений); θ_0 – относительная неисключённая систематическая погрешность (НСП) воспроизведения; θ_i – НСП измерений при воспроизведении единицы для i -го источника погрешности; u_A , u_B – стандартные неопределённости соответственно по типам А, В; u_c – суммарная стандартная неопределённость при воспроизведении объёмной активности радона, U_p – расширенная неопределённость при коэффициенте охвата $k = 2$.

Метод воспроизведения плотности потока радона. Метод воспроизведения единицы плотности потока радона основан

на его накоплении в барботере в течение не менее десяти периодов полураспада радона (40 суток) и переводе всего накопленного радона в герметичную ёмкость объёмом $V = (0,1000 \pm 0,0001) \text{ м}^3$ [9]. При этом активность накопленного радона $A(^{222}\text{Rn})$ с погрешностью не более 0,5 % равна активности материнского радионуклида ^{226}Ra . Измерение активности радионуклида ^{226}Ra выполняется на гамма-спектрометре с детектором из особо чистого германия.

Плотность потока радона определяется по формуле

$$\varphi_{\text{Rn}} = Q_{\text{Rn}} V / (S \tau),$$

где Q_{Rn} – объёмная активность ^{222}Rn в накопительной камере; V – объём накопительной камеры; S – площадь поверхности эманирования; τ – время измерения Q_{Rn} в накопительной ёмкости.

Составляющие погрешности и неопределённости результатов измерений при воспроизведении единицы плотности потока радона представлены формулами и в табл. 2:

$$S_0 = 4,0 \%; \theta_0 = 1,4 \left[\sum \theta_i^2 \right]^{1/2} = 6,3 \%;$$

$$u_A = 4,0 \%; u_B = 2,6 \%;$$

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + \sum_i^N u_{Bi}^2} = 4,6 \%; U_p = 2u_c = 9,2 \%.$$

Метрологические характеристики ГЭТ 39-2021 представлены в табл. 3.

Заключение. ГЭТ 39-2021 позволяет обеспечить единство измерений при контроле радиационной обстановки и выполнении требований радиационной безопасности как персонала, так и населения, и способствует выполнению требований федеральных законов ^{3, 4, 5}, нормативных и методических документов в области использования атомной энергии и санитарно-эпидемиологического благополучия ^{6, 7, 8, 9}.

Обеспечение единства и правильности измерений, в свою очередь, способствует социальному прогрессу, так как улучшаются условия контроля радиационной безопасности персонала, что позволяет гарантировать безопасность при использовании ядерных реакторов на атомных станциях и других предприятиях атомной отрасли.

В настоящее время совершенствование ГЭТ 39-2021 направлено на повышение точности воспроизведения единиц и совершенствование методов передачи единиц.

Список источников

1. Долженков И. В. Нормирование и контроль газоаэрозольных выбросов на атомных станциях. Состояние и перспективы // АНРИ. 2006. № 3 (46). С. 4–5.
2. Турмарш М., Харрисон Дж. Д., Лурье Д., Пак Ф., Бланшардон Е., Марш Дж. В. Риск возникновения рака легкого при облучении радоном и продуктами его распада. Заявление по радону / Под ред. М. В. Жуковского, С. М. Киселева, А. Т. Губина; пер. публикации 115 МКРЗ. М.: ГНЦ ФМБЦ им. А. И. Бурназяна ФМБА России, 2013. 92 с. <https://doi.org/10.1016/j.icrp.2011.08.011>
3. Лекомте Ж.-Ф., Соломон С., Такала Дж., Юнг Т., Странд П., Мюрит К., Киселев С., Жуо В., Шеннон Ф., Янсенс А. Радиологическая защита от облучения радоном / Под ред. М. В. Жуковского, И. В. Ярмошенко, С. М. Киселева; пер. публикации 126 МКРЗ. М.: ГНЦ ФМБЦ им. А. И. Бурназяна ФМБА России, 2015. 92 с.
4. Kim B. C., Lee K. B., Park T. S., Lee J. M., Lee S. H., Oh P. J., Lee M. K., Ahn J. K., *Appl. Radiat. Isot.*, 2012, vol. 70, pp. 1934–1939. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2012.02.020>
5. Sabot B., Pierre S., Cassette P. et al., *Radiat. Prot. Dosimetry*, 2015, vol. 167, no 1–3, pp. 70–74. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncv221>
6. Бирюков С. Г. Государственный первичный специальный эталон единицы объёмной активности радиоактивных аэрозолей ГЭТ 39-2014 // Российская Метрологическая Энциклопедия / Под ред. В. В. Окрепилова. В двух томах. СПб.: ИИФ «Лики России», 2015. Т. 1. С. 715–716.
7. Алейкин В. В., Бирюков С. Г., Коваленко О. И., Орлов А. А. Государственный первичный эталон единицы объёмной активности радиоактивных аэрозолей ГЭТ 39-2014 // Вестник метролога. 2019. № 2. С. 7–11.
8. Audi G., Bersillon O., Blachot J., Wapstra A. H., *Nuclear Physics A*, 1997, vol. 624, no. 1, pp. 1–124. [https://doi.org/10.1016/S0375-9474\(97\)00482-X](https://doi.org/10.1016/S0375-9474(97)00482-X)
9. Бирюков С. Г., Коваленко О. И., Орлов А. А. Состояние и перспективы развития эталонных средств воспроизведения единиц объёмной активности радона и торона

³ Федеральный закон от 21 ноября 1995 г. № 170-ФЗ «Об использовании атомной энергии».

⁴ Федеральный закон от 09.01.1996 № 3-ФЗ «О радиационной безопасности населения».

⁵ Федеральный закон от 30.03.1999 № 52-ФЗ «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения».

⁶ Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523-09 «Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009».

⁷ Санитарные правила и нормативы СП 2.6.1.2612-10 «Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010)».

⁸ Методические указания МУ 2.6.1.2838-11 «Радиационный контроль и санитарно-эпидемиологическая оценка жилых, общественных и производственных зданий и сооружений после окончания их строительства, капитального ремонта, реконструкции по показателям радиационной безопасности».

⁹ Методические указания МУ 2.6.1.2398-08 «Радиационный контроль и санитарно-эпидемиологическая оценка земельных участков под строительство жилых домов, зданий и сооружений общественного и производственного назначения в части обеспечения радиационной безопасности».

и плотности потока радона с поверхности грунта // Измерительная техника. 2020. № 1. С. 68–72.

<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2020-1-69-73>

References

1. Dolzhenkov I.V., *ANRI*, 2006, no. 3(46), pp. 4–5. (In Russ.)
2. Clement C. H., Tirmarche M., Harrison J. D., et al., ICRP Publication 115: Lung Cancer Risk from Radon and Progeny and Statement on Radon, *Annals of the ICRP*, 2010, vol. 40, no. 1, pp. 1–64. <https://doi.org/10.1016/j.icrp.2011.08.011>
3. Lecomte J.-F., Solomon S., Takala J., et al., ICRP Publication 126: Radiological Protection against Radon Exposure, *Annals of the ICRP*, 2014, vol. 43, no. 3, pp. 5–73. <https://doi.org/10.1177/014664531454221>
4. Kim B. C., Lee K. B., Park T. S., Lee J. M., Lee S. H., Oh P. J., Lee M. K., Ahn J. K., *Appl. Radiat. Isot.*, 2012, vol. 70, pp. 1934–1939. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2012.02.020>

5. Sabot B., Pierre S., Cassette P. et al., *Radiat. Prot. Dosimetry*, 2015, vol. 167, no 1–3, pp. 70–74.

<https://doi.org/10.1093/rpd/ncv221>

6. Biryukov S. G., State primary special standard of the unit of volumetric activity of radioactive aerosols GET 39-2014, *Russian Metrological Encyclopedia*, Ed. V. V. Okrepilova, St. Petersburg, IIF “Liki Rossii” Publ., 2015, vol. 1, pp. 715–716. (In Russ.)

7. Aleikin V. V., Biryukov S. G., Kovalenko O. I., Orlov A. A., Gosudarstvennyi pervichnyi etalon edinitsy ob’emnoi aktivnosti radioaktivnykh aerolei GET 39-2014, *Vestnik Metrologa*, 2019, no. 2, p.7–11. (In Russ.)

8. Audi G., Bersillon O., Blachot J., Wapstra A. H., *Nuclear Physics A*, 1997, vol. 624, no. 1, pp. 1–124.

[https://doi.org/10.1016/S0375-9474\(97\)00482-X](https://doi.org/10.1016/S0375-9474(97)00482-X)

9. Biryukov S. G., Kovalenko O. I., Orlov A. A., *Measurement Techniques*, 2020, vol. 63, no. 1, pp. 71–76.

<https://doi.org/10.1007/s11018-020-01752-w>

Статья поступила в редакцию 30.05.2022; одобрена после рецензирования 06.07.2022; принята к публикации 08.07.2022.
The article was submitted 30.05.2022; approved after reviewing 06.07.2022; accepted for publication 08.07.2022.