

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ



УДК 621

DOI:10.30724/1998-9903-2022-24-3-3-14

ОСОБЕННОСТИ ПРЯМЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ОБЪЕМНОЙ АКТИВНОСТИ РАДИОНУКЛИДОВ В ВОЗДУХЕ РАБОЧЕЙ ЗОНЫ

Герасименко¹ А.С., Дорохов¹ С.В., Криворотова^{1,2} В.В.

¹Филиал «Сибирский территориальный округ» ФГУП «ФЭО», г. Иркутск, Россия

²Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Россия

<http://orcid.org/0000-0003-0801-9112>, VVKrivorotova@rosfeo.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Рассмотреть проблемные вопросы, связанные с измерениями радионуклидов в воздухе рабочей зоны, выделяемых при переупаковке сыпучих твердых радиоактивных отходов при выводе из эксплуатации объектов использования атомной энергии. Разработать метод прямых измерений для оперативного контроля концентрации радиоактивных аэрозолей в воздухе рабочей зоны, обеспечивающий неперевышения контрольного уровня по годовой эффективной дозе персонала. *МЕТОДЫ.* Для решения поставленной задачи применялся метод расчета максимально возможного количества альфа-частиц на отобранной пробе аналитического фильтра АФА-РСП20. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Предложен метод оперативного контроля радиационной обстановки на рабочих местах персонала с помощью прямых измерений переносными приборами радиационного контроля плотности потока альфа-частиц с экспонированного фильтра АФА-РСП20. Применение данного метода позволяет обеспечить контроль в тех случаях, когда применение стандартных установок для измерений объемной активности радиоактивных аэрозолей недоступно или невозможно. В статье описана актуальность темы, приведен расчет контрольного уровня плотности потока альфа-частиц с поверхности фильтра АФА-РСП20. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Паспортные характеристики средств индивидуальной защиты органов дыхания не дают убедительных данных о работе фильтра с конкретным загрязнителем. Для правильного принятия решения о применении тех или иных видов средств индивидуальной защиты органов дыхания персоналом, работающим с радиоактивными отходами, содержащими трансурановые радионуклиды, необходимо контролировать объемную активность радионуклидов в воздухе. На основе расчета и прямых измерений показано, что применение оперативного метода измерения плотности потока альфа-частиц с экспонированного фильтра АФА-РСП20 позволяет обеспечить контроль за радиационной обстановкой на рабочих местах персонала при выводе из эксплуатации объектов использования атомной энергии.

Ключевые слова: прямое измерение; альфа-частица; радиоактивные аэрозоли; дозиметр радиометр; контрольный уровень.

Для цитирования: Герасименко А.С., Дорохов С.В., Криворотова В.В. Особенности прямых измерений для оценки объемной активности радионуклидов в воздухе рабочей зоны // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т.24. № 3. С. 3-14. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-3-3-14.

FEATURES OF DIRECT MEASUREMENTS FOR EVALUATION OF THE VOLUME ACTIVITY OF RADIONUCLIDES IN THE AIR OF THE WORKING AREA

AS. Gerasimenko¹, SV. Dorokhov¹, VV. Krivorotova^{1,2}

¹Branch «Siberian Territorial District» of the Federal State Unitary Enterprise «Federal Environmental Operator», Irkutsk, Russia

²Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia

<http://orcid.org/0000-0003-0801-9112>, VVKrivorotova@rosfeo.ru

Abstract: OBJECT. To consider problematic issues related to measurements of radionuclides in the air of the working area released during repackaging of bulk solid radioactive waste during decommissioning of nuclear energy facilities. To develop a method of direct measurements for operational control of the concentration of radioactive aerosols in the air of the working area, ensuring that the control level is not exceeded by the annual effective dose of personnel. **METHODS.** To solve this problem, the method of calculating the maximum possible number of alpha particles on the selected sample of the analytical filter AFA-RSP20 was used. **RESULTS.** A method of operational control of the radiation situation in the workplaces of personnel using direct measurements by portable radiation monitoring devices of the alpha particle flux density from the exposed AFA-RSP20 filter is proposed. The use of this method makes it possible to provide control in cases where the use of standard installations for measuring the volumetric activity of radioactive aerosols is unavailable or impossible. The article describes the relevance of the topic, the calculation of the reference level of the alpha particle flux density from the surface of the AFA-RSP20 filter is given. **CONCLUSIONS.** Passport characteristics of personal respiratory protection equipment do not provide convincing data on the operation of the filter with a specific pollutant. For the correct decision-making on the use of certain types of personal respiratory protection by personnel working with radioactive waste containing transuranium radionuclides, it is necessary to control the volumetric activity of radionuclides in the air. Based on calculations and direct measurements, it is shown that the use of an operational method for measuring the alpha particle flux density from an exposed AFA-RSP20 filter makes it possible to monitor the radiation situation at personnel workplaces during decommissioning of nuclear energy facilities.

Keywords: direct measurement; alpha particle; radioactive aerosols; dosimeter radiometer; control level.

For citation: Gerasimenko AS, Dorokhov SV, Krivorotova VV. Features of direct measurements for evaluation of the volume activity of radionuclides in the air of the working area. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022; 24(3):3-14. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-3-3-14.

Введение и литературный обзор

При выводе из эксплуатации объектов использования атомной энергии (далее ОИАЭ) проводятся работы с твердыми радиоактивными отходами (далее РАО). При этом возможны выбросы радиоактивных веществ (далее РВ) в воздух рабочей зоны персонала. РВ могут находиться в воздухе в виде газа, пара, аэрозолей и в различных комбинациях этих состояний. Радиоактивные аэрозоли образуются под действием механизмов конденсации и диспергирования. В воздухе всегда присутствуют твердые и жидкие частицы субмикронных размеров – ядра конденсации [1]. В результате диффузного осаждения на летучих радионуклидах образуются конденсационные радиоактивные аэрозоли [2]. При подъеме радиоактивных частиц с различных поверхностей воздушными потоками, распылении радиоактивных жидкостей, резке загрязнённых радиоактивностью материалов образуются диспергированные радиоактивные аэрозоли. Аэрозоли чрезвычайно подвижны и неустойчивы. Между газовой средой и частицами происходит постоянное взаимодействие, которое приводит к изменению как дисперсного, так и фазового состава аэрозолей.

Воздействие радиоактивных аэрозолей на организм человека осуществляется в основном за счет внутреннего облучения: частицы, вдыхаемые с воздухом, осаждаются на внутренней поверхности органов дыхания, затем проникают в кровь и разносятся по организму [3]. Радионуклиды селективно концентрируются в критических органах. Для защиты органов дыхания применяют специальные средства индивидуальной защиты. При этом, необходимо обеспечить надежную фильтрацию радиоактивных аэрозолей и снижение их проникновения через область обтюрации средств индивидуальной защиты (далее СИЗОД).

Согласно [4] в интервале размеров аэрозольных частиц от 0,001 мкм до 0,1 мкм, т.е. в пределах двух порядков и вне «рабочих» зон современных средств очистки воздуха существует один из максимумов проницаемости. В ряде работ [5, 6] приводятся сведения о возможности существования в выбросах АЭС частиц, размеры которых менее 0,2 мкм. Имеются данные, что на долю частиц йода-131 менее 0,2 мкм приходится

до 42 %, хрома-51 — 33 %, цезия-137, цезия-134, марганца-54, циркония-95 — от 11 до 18 % от общего числа частиц. Частицы таких размеров могут образовываться в результате конденсации в атмосфере паров легколетучих продуктов деления, главным образом, цезия, стронция и плутония [7]. Поэтому, достаточно сложной проблемой является защита органов дыхания человека от радиоактивного газа, пара, аэрозолей и различных комбинаций этих состояний.

Значительная часть радионуклидов при попадании в организм может в нем задерживаться [8], поэтому даже при минимальном превышении предельно допустимых уровней содержание РВ в воздухе, первостепенное значение имеет качество применяемых СИЗОД [9]. Их роль и значение определяется тем, что своевременное и правильное использование СИЗОД позволяет в определенных условиях снизить поступление радионуклидов в организм до допустимых значений и сохранить тем самым здоровье людей.

В свою очередь, к средствам индивидуальной защиты органов дыхания от радиоактивных аэрозолей предъявляются весьма жесткие требования, поскольку необходимо обеспечить очень высокую степень защиты от попадания радионуклидов внутрь организма. Совершенно очевидно, что одинаковые по классу (*FFP3*) средства защиты респиратор ШБ-1 Лепесток-200 *FFP3* и фильтр ДОТ-600 с маской МАГ имеют существенно разные защитные свойства и ресурс работы. Отсюда следует, что при выборе СИЗОД, в первую очередь, должны учитываться ограничения по их использованию в зависимости от назначения и особенности среды, для которой они применяются [10].

Известны [11, 12] методы контроля концентрации радиоактивных частиц в воздухе рабочей зоны. Принцип их работы основан на регистрации альфа-, бета-излучения радионуклидов, осажденных на аэрозольный фильтр [13, 14]. В этом случае, воздух принудительно прокачивается через рабочую камеру блока детектора (рис. 1). Над рабочей зоной фильтра расположен детектор с коллиматором и предусилитель.



Рис. 1. Установка для измерений объёмной активности радиоактивных аэрозолей.

Fig. 1. Device for measuring the volumetric activity of radioactive aerosols.

Альфа- и бета- излучение частиц аэрозоля, осевших на фильтре, попадая на детектор, формирует электрический сигнал, амплитуда которого пропорциональна энергии, регистрируемых альфа частиц (рис.2), а количество импульсов определенной амплитуды пропорционально активности частиц определенной энергии.

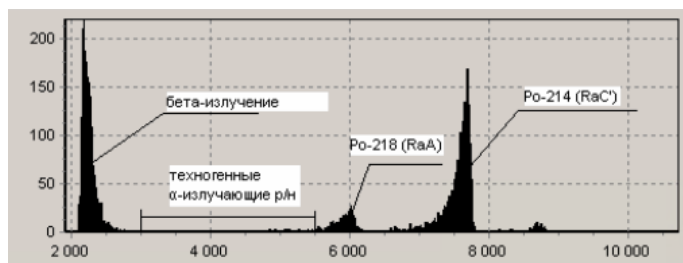


Рис. 2. Энергетический спектр излучения рабочей зоны фильтра после прокачки воздуха.

Fig. 2. The energy spectrum of the radiation of the working area of the filter after air pumping.

Установка для измерений объёмной активности радиоактивных аэрозолей имеет свои достоинства – непрерывность процесса измерения, возможность сигнализации о превышении установленного контрольного уровня, способность разделять поток альфа-излучения по энергетическому спектру и, тем самым, учитывать вклад радона и его

дочерних продуктов распада в общем потоке регистрируемого излучения [15, 16]. Однако высокая стоимость оборудования делает её не всегда доступной для применения. Вместе с тем, установка для измерений объемной активности радиоактивных аэрозолей не позволяет оценить защитные свойства применяемых персоналом СИЗОД при работах с пылеобразующими РАО.

В настоящей статье предлагается метод измерения концентрации альфа-частиц в воздухе рабочей зоны персонала, основанный на отборе проб воздуха на аналитический фильтр с помощью аспиратора, с последующим измерением плотности потока излучения с его поверхности переносными приборами радиационного контроля (например, дозиметром-радиометром ДКС-96 с соответствующими блоками детектирования). В отличие от существующих, предлагаемый метод является оперативным, более доступным и приемлемым в случае необходимости периодического контроля вклада радионуклидов (например, трансурановых) в ожидаемую дозу внутреннего облучения персонала и установления некоего контрольного уровня для оперативного принятия решения. Кроме того, применение специально разработанных переходников, совмещенных с аспиратором резьбовым соединением, позволяет оперативно оценить защитные свойства таких СИЗОД, как полнолицевые маски с противогазовыми фильтрами ДОТ-600, UNIX, 3М.

Материалы и методы

С точки зрения внутреннего облучения наиболее опасными являются альфа-излучающие радионуклиды [15], так как пробег альфа-частиц в веществе мал, и их энергия целиком поглощается вблизи места концентрации радионуклида [18]. При ингаляции наибольший дозовый коэффициент соответствует трансурановым элементам, например, плутонию-239 ($\epsilon_{\text{перс}}^{\text{возд}} = 4,7 \cdot 10^{-5}$ Зв/Бк [19]), поэтому целесообразно при оперативном контроле измерять именно альфа-излучение, однако при наличии значительного компонента бета-излучателей можно добавить в мониторинг и этот компонент.

Для гарантированного непревышения допустимой годовой эффективной дозы персонала в расчетах применим наибольшие параметры, влияющие на дозу, при этом, считая, что все радионуклиды, попавшие в организм, оказывают 100% воздействие на дозу внутреннего облучения. Такое допущение упростит расчет и позволит гарантированно не превысить реальные дозы персонала по сравнению с расчетными. Учитывая основные пределы доз [20] для расчета установим контрольный уровень (КУ) по эффективной дозе персонала группы «А» 15 мЗв в год. Введем КУ по внешнему облучению - 5 мЗв, тогда допустимая доза по внутреннему облучению может быть не более 10 мЗв.

Для расчета возьмем 2022 год, где количество рабочих дней 247, из них 36 дней отпуска и 3 дня (минимум) дополнительного отпуска за работу во вредных условиях труда. Итого 208 рабочих дней - это максимально возможное количество дней работы персонала группы А во вредных условиях труда. Тогда максимальная доза внутреннего облучения за один рабочий день $E_{\text{в макс}}$:

$$E_{\text{в макс}} = \frac{10 \text{ мЗв}}{208 \text{ раб.дней}} = 0,048 \text{ мЗв} = 48 \cdot 10^{-6} \text{ Зв}$$

Для дальнейших расчетов, необходимо определиться с величиной дозового коэффициента радионуклида $\epsilon_{\text{перс}}^{\text{возд}}$. При этом, $\epsilon_{\text{перс}}^{\text{возд}}$ следует выбрать исходя из реальной смеси радионуклидов в контролируемой зоне дыхания. Для этого следует сравнить активности радионуклидов в пробе воздуха и определить дозовый коэффициент пропорционально вкладу основных загрязнителей пропорцией, затем полученный результат сместить на 20 % вверх или взять для расчетов максимальный коэффициент, если соотношение радионуклидов в смеси может меняться во времени.

Настоящий расчет ведем по трансурановым элементам, в частности по плутонию-239. Для него дозовый коэффициент составляет $\epsilon_{\text{перс}}^{\text{возд}} = 4,7 \cdot 10^{-5}$ Зв/Бк (для соединений, имеющих промежуточную скорость всасывания - П). Тогда максимально допустимая активность $A_{\text{макс}}$ смеси радионуклидов, которая может попасть в легкие работнику за один рабочий день, составит:

$$A_{\text{макс}} = \frac{E_{\text{в макс}}}{\epsilon_{\text{перс}}^{\text{возд}}} = 1 \text{ Бк}$$

В соответствии с [21] средний объем вдыхаемого персоналом воздуха составляет

1,41 м³. Для расчета возьмем длительность смены 4 часа, тогда объем вдыхаемого воздуха за это время составит 5,64 м³. В результате, объемная активность вдыхаемого персоналом воздуха не должна превышать величину:

$$A_{\text{об.макс}} = \frac{A_{\text{макс}}}{5,64} = 0,177 \text{ Бк / м}^3.$$

Следовательно, активность, вдыхаемая персоналом с воздухом в рабочей зоне за 1 час не должна превысить величину:

$$A_{\text{ул.макс.г}} = \frac{A_{\text{макс}}}{4 \text{ ч}} = 0,25 \text{ Бк / час.}$$

Для анализа объемной активности радионуклидов в воздухе аэрозоли из контролируемого объема воздуха должны собираться на аналитический фильтр с помощью пробоотборного устройства, например ПУ-5. Так как данный фильтр состоит из волокон перхлорвинила, то все собранные аэрозоли будут концентрироваться в тонком слое мембраны этого фильтра [22]. Следует отметить, что приближение аэрозольных частиц к поверхности волокна происходит по разным механизмам: за счет диффузии, касания, инерции, электростатического притяжения. Как правило, самые мелкие частицы, размером меньше 0,3 мкм, улавливаются преимущественно за счет диффузионного эффекта, а частицы больших размеров – преимущественно под действием механизмов касания, инерции и седиментации. Электростатический эффект осаждения проявляется в значительной степени при наличии высокозаряженных частиц и/или волокон. Таким образом, весь собранный радиоактивный материал концентрируется в тонком слое на поверхности аналитического фильтра, что чрезвычайно важно для измерения альфа излучения. Это позволяет анализировать объемную активность радионуклидов в воздухе при помощи дозиметра радиометра, измеряющего плотность потока излучения с поверхности объекта (фильтра) и аспиратора, измеряющего объем прокаченного через фильтр воздуха.

Для измерения плотности потока альфа-излучения с поверхности фильтра можно использовать дозиметр-радиометр ДКС-96 (рис. 3) с блоком детектирования БДЗА-96 (при необходимости можно учесть и бета излучение, с помощью блока детектирования БДЗБ-96). Задача сводится к пересчету объемной активности, измеряемой в Бк/м³ в плотность потока излучения с поверхности фильтра, выражаемую обычно в единицах частица/(см²·мин). При этом, единицы измерения активности 1 Бк соответствует одному распаду в секунду, в данном случае одной альфа частице в секунду, попавшей на поверхность детектора.



Рис. 3. Измерение альфа-частиц дозиметром радиометром ДКС-96 (блок БДЗА-96) с экспонированного фильтра АФА-РСР20

Fig. 3. Measurement of alpha particles by a dosimeter with a DKS-96 radiometer (BDZA-96 unit) from an exposed AFA-RSP 20 filter

Чтобы получить искомую величину – активность радионуклидов в анализируемом объеме воздуха – следует разместить экспонированный аналитический фильтр АФА-РСР20 над рабочей поверхностью вверх на ровной и чистой горизонтальной поверхности (например, чистый лист бумаги), установить на него детектор. На рисунке 3 показано измерение альфа-частиц с экспонированного фильтра АФА-РСР20 дозиметром радиометром ДКС-96 с блоком детектирования БДЗА-96.

Дозиметр радиометр ДКС-96 с блоком детектирования БДЗА-96 производит прямые измерения плотности потока альфа излучения с поверхности в единицах: частица/(см²·мин.) [23]. Детектор представляет собой тонкий органический сцинтиллятор,

покрытый слоем порошка ZnS (Ag), его площадь составляет 70 см^2 . Детектор пересчитывает все зарегистрированное излучение на 1 см^2 исходя из своей площади, следовательно, надо измеренное значение умножить на площадь детектора 70 см^2 для получения полного потока альфа-излучения с фильтра.

Расстояние от поверхности детектора до фильтра минимально, но поверхность детектора не соприкоснется с фильтром, что гарантирует чистоту детектора. Диаметр детектора значительно больше диаметра фильтра, следовательно, практически все альфа частицы, выпущенные в сторону детектора будут зарегистрированы.

Определив количество частиц на экспонированном фильтре АФА-РСР20, можем оценить допустимую объемную активность на рабочем месте, а также ввести контрольный уровень для обеспечения нормальных условий работы персонала и соблюдения норм радиационной безопасности при работах по выводу из эксплуатации ОИАЭ.

Результаты и обсуждения

Рассмотрим применение предложенного метода при оценке объемной активности радионуклидов в воздухе рабочей зоны персонала при выполнении им работ по переупаковке твердых РАО с содержанием трансурановых элементов, где преобладающим радионуклидом является плутоний-239.

Оценим величину контрольного уровня по потоку альфа частиц с экспонированного фильтра АФА РСР20 для контроля предельной концентрации радиоактивных аэрозолей в воздухе рабочей зоны при применении персоналом СИЗОД (для расчета берем полнолицевую маску с фильтром ДОТ-600). Для оценки эффективности использования фильтра ДОТ-600 можно использовать паспортные характеристики фильтра ДОТ-600 (50 ПДК) или комплекта маска+фильтр (до 200ПДК), но это не дает убедительных данных о работе фильтра с конкретным загрязнителем, так как испытания СИЗОД проводятся по стандартизированной схеме и не учитывают особенностей конкретной фильтруемой среды.

Для точного понимания эффективности фильтра, были проведены испытания фильтра ДОТ-600 в условиях конкретного загрязняющего фактора. Отбор проб производился с помощью специально разработанных и изготовленных деталей из фторопласта (рис. 4): 1 – переходник для отбора воздуха через противогазовые фильтры типа ДОТ-600, БРИЗ-3001 (или аналогичные); 2 – переходник для отбора воздуха через противогазовый фильтр типа UNIX, ЗМ (или аналогичные); 3 – прижимное кольцо для надежной фиксации аналитического фильтра АФА-РСР20. Все изготовленные детали имеют резьбовое соединение совместимое с входом расходомера-пробоотборника ПУ-5, а переходники (детали 1 и 2) – еще и резьбовое соединение с выходом противогазового фильтра.

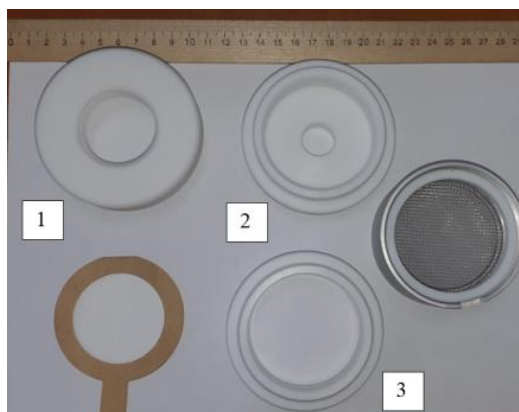


Рис. 4. Комплект фторопластовых переходников Fig. 4. Set of fluoroplastic adapters to PU-5 к ПУ-5

Отбор проб воздуха осуществляется с помощью расходомера-пробоотборника радиоактивных газоаэрозольных смесей ПУ-5 в двух вариантах с одинаковыми условиями (радионуклидный состав РАО, прокачка воздуха 500 литров):

- непосредственный отбор проб воздуха из рабочей зоны на аналитический фильтр АФА-РСР20 (рис. 5) – регистрировалось излучение альфа частиц на уровне $167 \text{ частиц}/(\text{см}^2 \cdot \text{мин})$;

- отбор проб воздуха на АФА-РСР20 через фильтр ДОТ-600 (рис. 6) – регистрировалось излучение альфа частиц на уровне $1,21 \text{ частиц}/(\text{см}^2 \cdot \text{мин})$.



Рис. 5. Отбор проб воздуха непосредственно на аналитический фильтр АФА-РСП20

Fig. 5. Air sampling directly to the AFA-RSP20 analytical filter



Рис. 6. ПУ-5 в сборе с аналитическим фильтром АФА-РСП20 и ДОТ-600.

Fig. 6. PU-5 assembled with search filters AFA-RSP20 and DOT-600.

При прокачке на ПУ-5 выбрана оптимальная скорость 50 л/мин. – это обеспечивает нормальный режим продувки фильтра. Увеличение пропускной способности (воздушной нагрузки) приводит к сокращению времени отбора пробы и, следовательно, к сокращению общего времени анализа. Однако это приводит к увеличению сопротивления фильтра и часто – к соответствующему снижению производительности аспирационного устройства, а также к возможности механического повреждения поверхности.

Далее, оценим величину коэффициента проскока частиц для фильтра ДОТ-600 в реальных условиях его применения: поток альфа излучения от частиц, собранных аналитическим фильтром АФА-РСП20 после прокачки 500 литров воздуха напрямую составил 168,67 частиц/(см²·мин), а с предварительным фильтрованием через ДОТ-600 – 1,22 частиц/(см²·мин), что соответствует коэффициенту проскока для ДОТ-600 – 0,723 %.

Тогда, допустимая объемная активность на рабочем месте при применении СИЗОД составит:

$$A_{\text{доп.макс}} = \frac{A_{\text{об.макс}} \cdot n \cdot 100\%}{0,723\%} = 24,5 \frac{\text{Бк}}{\text{м}^3}.$$

Поскольку измерения активности, собранной на фильтре АФА-РСП20 производится альфа детектором (БДЗА-96) радиометра ДКС-96, то необходимо учитывать, что частицы, выпущенные с фильтра в противоположную сторону от детектора, зарегистрированы им не будут. Кроме того, дозиметр-радиометр ДКС-96 измеряет поток за 1 минуту, но активность – это количество распадов в секунду (или частиц в секунду), а также необходимо полученный результат привести к нормируемому объему воздуха 1 м³.

С учетом вышесказанного, для контроля уровня допустимой активности аэрозолей определим контрольный уровень для потока альфа частиц с экспонированного фильтра АФА-РСП20 по показаниям дозиметра радиометра ДКС-96 с детектором БДЗА-96 в единицах частиц/(см²·мин):

$$\varphi_{\alpha} = \frac{A_{\text{доп.макс}} \cdot 60 \cdot 0,5}{2 \cdot 70} = 5,25 \frac{\text{част}}{\text{мин} \cdot \text{см}^2}$$

здесь объемную активность $A_{\text{доп.макс}}$ делим на 2 – детектор БДЗА-96 может зафиксировать только половину распадов (альфа частиц), поток которых направлен в его сторону (вторая

половина потока альфа частиц распространяется в противоположную от детектора сторону), умножаем на 60 секунд – измерения радиометром ДКС-96 выдаются за минуту, делим на 70 – площадь детектора 70 см², а ДКС-96 выдает результат, нормированный на 1 см², умножаем на отобранный объем воздуха, пропущенный через фильтр АФА-РСР20 в единицах кубических метров (0,5 м³).

Учитывая погрешность измерения для ДКС-96 с блоком БДЗА-96 [17]:

$$\pm(20 + 5/A_x) = \pm(20 + 5/5,25) = 20,95\% \text{ (или } 1,1 \frac{\text{част}}{\text{мин} \cdot \text{см}^2}\text{)},$$

получим контрольный уровень плотности потока альфа-частиц с экспонированного 500 литрами воздуха на любом рабочем месте персонала:

$$K\phi_{\alpha} = 4,15 \frac{\text{част}}{\text{мин} \cdot \text{см}^2}$$

$K\phi_{\alpha}$ - контрольный уровень допустимой объемной активности в воздухе на рабочих местах персонала, при применении ими СИЗОД. Здесь следует отметить, что полученный контрольный уровень подлежит согласованию в органах ФМБА России.

Наличие радона и его дочерних продуктов распада в воздухе контролируемой зоны выполнения работ, осложняет применение предлагаемого метода, так как дозиметр-радиометр ДКС-96 не может оценить вклад продуктов распада радона в измеряемом потоке альфа-излучения с фильтра. Для получения истинного результата по стабильным изотопам (например, трансурановым) необходимо повторно измерять экспонированный фильтр спустя 3-5 суток. Это снижает оперативность метода, но вполне приемлемо при оценке радиационной обстановке квазистационарных рабочих мест, где контролируемые радиационные характеристики резко не меняются. О вкладе радона в объемную активность можно судить по статистическим данным ранее произведенных измерений при регулярном периодическом отборе проб воздуха. Этого вполне достаточно для принятия решения об ограничении работы персонала по времени и необходимости изменения режимов работы оборудования и систем принудительной вентиляции, а оценку ожидаемой годовой дозы внутреннего облучения персонала можно проводить по данным повторных измерений (спустя 4-5 дней) ранее экспонированных фильтров.

Следует отметить, что согласно нормативно-технической документации («МУ2.6.5.008-2016. 2.6.5. Атомная энергетика и промышленность. Контроль радиационной обстановки. Общие требования. Методические указания», утв. ФМБА России 22.04.2016) в организациях должен быть разработан и согласован с ФМБА России порядок (программа, план, регламент) радиационного контроля (РК) в части организации контроля радиационной обстановки в местах работы персонала. В указанном документе должны быть отражены: вид контроля и контрольные уровни радиационных параметров; объекты РК; контролируемые виды и энергетические спектры излучения; используемые приборы РК; используемые методики; периодичность контроля; форму представления и регистрации результатов РК.

В таблице представлена часть такой программы. Предлагаемая периодичность контроля в таблице учитывает влияние радона и его дочерних продуктов распада в воздухе контролируемой зоны.

Таблица

Номенклатура, периодичность и объем радиационного контроля

Наименование контролируемого параметра	Плотность потока α - частиц
Объект проведения контроля/ точка контроля	Поверхность фильтр АФА-РСР20 после прокачки воздуха рабочей зоны ПУ-5 в объеме 500 литров / рабочая зона персонала
Периодичность контроля	Ежесменно; каждый час после начала работ. Измерение фильтра в 1й день, на 4й, 7й, 10й день.
Методика контроля	Руководство по эксплуатации "Дозиметры-радиометры ДКС-96". ТЕ1.415313.003РЭ, ТЕ1.415313.003-05РЭ
Аппаратура, прибор	ПУ-5, ДКС-96
Вид отчётного документа	Журнал или протокол
Структурное подразделение	Дозиметрист

Таким образом, при выполнении работ с твердыми РАО при выводе из эксплуатации объектов использования атомной энергии, можно оперативно контролировать радиационную обстановку в месте работ измеряя переносными

приборами радиационного контроля с альфа-блоками детектирования плотность потока альфа-частиц с экспонированного фильтра АФА-РСР20 – для принятия оперативного решения о применяемых СИЗОД, времени нахождения в рабочей зоне, а также прогноза ожидаемой эффективной дозы персонала.

Заключение

При выводе из эксплуатации объектов использования атомной энергии возникает необходимость радиационного контроля воздуха рабочей зоны в непосредственном месте работ персонала. В настоящее время применяют стандартные установки для измерений объемной активности радиоактивных аэрозолей, которые удобны в применении, позволяют непрерывно контролировать воздух рабочей зоны, имеют сигнализацию о превышении установленного контрольного уровня, имеют способность учитывать вклад радона и его дочерних продуктов распада в общем потоке регистрируемого излучения. Однако применение подобных установок часто недоступно в силу определенных причин и, что наиболее важно, при всех своих преимуществах они не позволяют оценить защитные свойства СИЗОД, применяемых персоналом при работе с открытыми источниками ионизирующего излучения и пылеобразующими РАО.

В статье предложен новый метод оперативного контроля объемной активности радионуклидов в воздухе рабочей зоны, основанный на отборе проб воздуха на аналитический фильтр с помощью аспиратора (например, ПУ-5), с последующим измерением плотности потока излучения с его поверхности переносными приборами радиационного контроля.

Результаты практического применения предложенного метода при работах с пылеобразующими твердыми радиоактивными отходами показали высокую практическую значимость – метод позволяет достаточно оперативно контролировать состояние воздуха на различных рабочих местах персонала, т.к. отбор 500 литров воздуха на фильтр АФА-РСР20 и дальнейший анализ с применением дозиметра-радиометра ДКС-96 (блок детектирования БДЗА-96) не превышает 10 минут.

В отличие от существующих способов контроля радионуклидов в воздухе рабочей зоны персонала, применение предлагаемого метода позволяет принять правильное решение о применении тех или иных видов средств индивидуальной защиты органов дыхания персоналом, работающего с радиоактивными отходами, содержащие трансураниевые радионуклиды (в том числе плутоний-239), а также контролировать эффективность систем вентиляции, рассчитывать ожидаемую годовую дозу персонала от внутреннего облучения групповым методом.

Разработанный и предложенный метод оперативного контроля объемной активности радионуклидов в воздухе рабочей зоны персонала на основе прямых измерений, может применяться как в виде основного метода, так и вспомогательно с другими методами, при выполнении персоналом радиационно опасных работ с открытыми источниками ионизирующего излучения и пылеобразующими РАО при выводе из эксплуатации объектов использования атомной энергии.

Литература

1. Москаленко Н.И., Хамидуллина М.С., Сафиуллина Я.С. Моделирование радиационного теплообмена в средах, возмущенных сильными антропогенными и природными воздействиями. III. Возможные климатические последствия постядерных конфликтов // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2014. № 9-10. С. 21-30.
2. Рыбин А.А., Рождественская Л.Н., Серебряков В.В., и др. Выбор и испытания поглощающих материалов для очистки газовой среды радиационно-защитных камер от летучих форм радиоактивных веществ // Сборник трудов АО «ГНЦ НИИАР». 2014. № 1. С. 46-53.
3. Senior Expert Symposium on Electricity and Environment. Helsinki, Finland, 13-17 May 1991, IAEA, 1991. 502 p.
4. Tran N.L., Locke P.A., Burke T.A. Chemical and Radiation Environmental Risk Management: Differences, Commonalities, and Challenges // Risk Analysis. 2020. Vol. 20. N2. pp. 163-172. doi: 10.1111/0272-4332.202017.
5. Гусев Н.Г., Головкой М.Ю., Шаповалов М.И., и др. Выброс радиоактивных газов и аэрозолей серийными атомными станциями // Атомная энергия. 1993. Т. 74. В.4. С. 360-364.
6. Chistyakova L.K., Kopytin Y.D. Spectroradiometric Inspection of Nuclear Pollution in The Atmosphere Based on Photochemical Effects // Optical Engineering. 2005. Vol. 44. N7. pp. 1-13. doi: 10.1117/1.1955204.

7. Замятин А.В. Оптимизация многослойных фильтров для измерения дисперсности радиоактивных аэрозолей в вентиляционных выбросах АЭС // Приборы. 2018. № 12(222). С.28-31.
8. Кузнецова А.Ю., Анциферова Е.Ю., Белоусов С.В., Хлебников С.В., Бочаров К.Г. Мониторинг радиационной обстановки при выводе из эксплуатации исследовательского корпуса Б АО «ВНИИНМ» // Атомная энергия. 2019. Т. 127. № 4. С 52-55.
9. Майзик А.Б., Цовьянов А.Г., Коренков И.П., и др. Защита персонала от аэрозольных выбросов при проведении дезактивационных работ при выводе из эксплуатации радиационно опасных объектов // АНРИ. 2020. № 4(103). С. 36-45.
10. Чикляев Е.Г., Танеева А.В., Коротаев О.Р., Перикова Е.С., Новиков В.Ф. Проблемы экологической безопасности промышленных предприятий // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2010. № 3-4. С. 122-130.
11. Романов А.В., Федотов А.В. Опыт внедрения радиометрической установки УДА-1АБ с целью создания системы непрерывного контроля радиационной обстановки на ОАО «Машиностроительный завод» // АНРИ. 2006. № 3(46). С .23-28.
12. Припачкин, Д. А., Демирташ У. Влияние коллиматора на качество спектра альфа-излучения // Радиоэкологические последствия радиационных аварий: к 35-ой годовщине аварии на ЧАЭС: Сборник докладов международной научно-практической конференции, Обнинск, 22–23 апреля 2021 года. Обнинск: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии». 2021. С. 215-217.
13. Припачкин Д.А., Хусейн Ю.Н., Будыка А. К., и др. Способ определения параметров дисперсного состава радиоактивных аэрозолей. Патент РФ на изобретение № RU 2676557 С1. 23.04.2018. Доступно по: <https://fips.ru/publication-web/publications/document?type=doc&tab=IZPM&id=6123EBF2-1C87-4A65-B8E1-046188F24D80> Ссылка активна на 07 апреля 2022 г.
14. Дорух И.Г., Огурцов Е.С., Скворцов О.А., и др. Способ измерения объемной активности бета-активных аэрозолей. Патент РФ на изобретение № RU 2547162 С2. 16.01.2013. Доступно по: <https://www1.fips.ru/Archive/PAT/2015FULL/2015.04.10/DOC/RUNWC2/000/000/002/547/162/DOCUMENT.PDF> Ссылка активна на 07 апреля 2022 г.
15. Демидов А.В., Дыганова Р.Я. Приборы и методы регистрации радона в воздухе, воде и почве // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2011. № 5-6. С. 121-124.
16. Chalupnik S. The Analysis of Results of Radon/Thoron Measurements Performed with the Use of Nuclear Track Detectors // Journal of Radiological Protection. 2020. Vol. 40. N 4. pp. 39-45. doi: 10.1088/1361-6498/abae0e.
17. Молоканов А.А., Кухта Б.А., Максимова Е.Ю. Сравнительный анализ подходов к нормированию и контролю внутреннего облучения персонала // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2021. Т. 66. № 6. С.102-110. DOI: 10.12737/1024-6177-2021-66-6-102-110.
18. Clarke R.H., Dunster J., Smith H., et al. The Environmental Safety and Health Implications of Plutonium // Journal of radiological protection. 1996. Vol. 16. N 2. pp. 91-105. doi: 10.1088/0952-4746/16/2/005.
19. Абрамов Ю. В. [и др.]; под общ. ред. Л. А. Ильина. Плутоний. Радиационная безопасность: монография. М.: ИздАТ, 2005. С. 415.
20. Гоский А.А., Перминова Г.С., Степанов В.С., и др. О нормах радиационной безопасности НРБ-99/2009 // АНРИ. 2009. № 4(59). С.18-20.
21. Aumalikova M., Ibrayeva D., Zhumadilov K., et al. Calculation of Radiation Burden of Personnel and Public, Working and Living in Area of the Uranium Mining and Uranium-Processing Enterprises. Bulletin of L.N. Gumilyov Eurasian National University. Physics. Astronomy Series. 2019. Vol. 2, N 127. pp. 38-47. doi: 10.32523/2616-68-36-2019-127-2-38-47.
22. Budyka A.K., Kirsch A.A., Ogorodnikov B.I. Filtration and Sampling by Fibrous Filters. Aerosols Handbook: Measurement, Dosimetry, and Health Effects, Second Edition. CRC Press. 2012. pp. 439-472. doi: 10.1201/b12668.
23. Стогний В.И., Девяткин И.В., Нурлыбаев К. Дозиметр-радиометр ДКС-96: в ногу со временем // АНРИ. 2008. № 4(55). С. 60-63.

Авторы публикации

Герасименко Александр Сергеевич - заместитель директора по общим вопросам, филиал

«Сибирский территориальный округ» Федеральное государственное унитарное предприятие «Федеральный экологический оператор».

Дорохов Сергей Владимирович – канд. физ.-мат. наук, начальник отдела радиационной, промышленной, экологической безопасности и охраны труда, филиал «Сибирский территориальный округ» Федеральное государственное унитарное предприятие «Федеральный экологический оператор».

Криворотова Виктория Викторовна - канд. физ.-мат. наук, начальник службы радиационной безопасности-начальник лаборатории, филиал «Сибирский территориальный округ», Федеральное государственное унитарное предприятие «Федеральный экологический оператор», доцент кафедры «Электроэнергетика транспорта», Иркутский государственный университет путей сообщения».

References

1. Moskalenko N.I., Khamidullina M.S., Safiullina YA.S. *Modeling of Radiative Heat Transfer in Environments Perturbed Strong Human and Natural Influence. III. Possible Climatic Consequences of Post-Nuclear Conflicts* // *Izvestiya vuzov. Problemy` e`nergetiki*. 2014; 9-10: 21-30.
2. Rybin A.A., Rozhdestvenskaya L.N., Serebryakov V.V., Baryshnikov S.G., Amelina E.V. *Vybor i ispytaniya pogloshchayushchikh materialov dlya ochistki gazovozdushnoy sredy radiatsionno-zashchitnykh kamer ot letuchikh form radioaktivnykh veshchestv. Proceedings of JSC "GNC NIAR"*. 2014; 1: 46-53.
3. Senior Expert Symposium on Electricity and Environment. Helsinki, Finland, 13-17 May 1991, IAEA, 1991. 502 p.
4. Tran N.L., Locke P.A., Burke T.A. Chemical and Radiation Environmental Risk Management: Differences, Commonalities, and Challenges // *Risk Analysis*. 2020. 20 (2): 163-172. doi: 10.1111/0272-4332.202017
5. Gusev N.G., Golovkoy M.Yu., Shamov M.I., et al. *Vybros radioaktivnykh gazov i aerorozley seriynymi atomnymi stantsiyami* // *Atomic Energy*. 1993; 74 (4): 360-364.
6. Chistyakova L.K., Kopytin Y.D. Spectroradiometric Inspection of Nuclear Pollution in The Atmosphere Based on Photochemical Effects // *Optical Engineering*. 2005; 44(7): 1-13. doi: 10.1117/1.1955204.
7. Zamyatin A.V. Optimizatsiya mnogoslownykh fil'trov dlya izmereniya dispersnosti radioaktivnykh aerorozley v ventilyatsionnykh vybrosakh AES // *Pribory*. 2018; 12(222): 28-31.
8. Kuznetsova A.Yu., Antsiferova E.Yu., Belousov S.V., et al. *Monitoring of radiation situation during the decommissioning of the research building* // *Atomic Energy*. 2019; 127 (4): 52-55.
9. Mayzik A.B., Tsov'yanov A.G., Korenkov I.P., et al. *Protection of personnel from aerosol emissions during decontamination work during the decommissioning of radiation hazardous facilities* // *ANRI*. 2020; 4(103): 36-45.
10. Chiklyayev E.G., Taneeva A.V., Korotaev O.R., Perikova E.S., Novikov V.F. *Problem of Ecological Air Safety of Industrial Enterprises* // *Izvestiya vuzov. Problemy` e`nergetiki*. 2010; 3-4: 122-130.
11. Romanov A.V., Fedotov A.V. *Opyt vnedreniya radiometricheskoy ustanovki UDA-1AB s tsel'yu sozdaniya sistemy nepreryvnogo kontrolya radiatsionnoy obstanovki na OAO «Mashinostroitel'nyy zavod»* // *ANRI*. 2006; 3(46): 23-28. (In Russ).
12. Pripachkin, D. A., Demirtash U. *The influence of a collimator on the quality of the alpha radiation spectrum* // *Radioecological consequences of radiation accidents: on the 35th anniversary of the Chernobyl accident : Collection of reports of the international scientific and practical conference, Obninsk, April 22–23, 2021 . Obninsk: Federal State Budgetary Scientific Institution "All-Russian Research Institute of Radiology and Agroecology"*. 2021: 215-217.
13. Pripachkin D.A., Khuseyn YU.N., Budyka A. K., et al. *Sposob opredeleniya parametrov dispersnogo sostava radioaktivnykh aerorozley*. Patent RUS № RU 2676557 C1. 23.04.2018. Available at: <https://fips.ru/publication-web/publications/document?type=doc&tab=IZPM&id=6123EBF2-1C87-4A65-B8E1-046188F24D80> Accessed: 07 Apr 2022.
14. Dorukh I.G., Ogurtsov Ye.S., Skvortsov O.A., et al. *Sposob izmereniya ob'yemnoy aktivnosti beta-aktivnykh aerorozley*. Patent RUS № RU 2547162 C2. 16.01.2013. Available at: <https://www1.fips.ru/Archive/PAT/2015FULL/2015.04.10/DOC/RUNWC2/000/000/002/547/162/DOCUMENT.PDF>. Accessed: 07 Apr 2022.
15. Demidov A.V., Dyganova R.Ya. *Devices and methods of registration of radon in air, water and soil* // *Izvestiya vuzov. Problemy` e`nergetiki*. 2011; 5-6: 121-124.

16. Chalupnik S. The Analysis of Results of Radon/Thoron Measurements Performed with the Use of Nuclear Track Detectors // *Journal of Radiological Protection*. 2020; 40 (4): 39-45. doi: 10.1088/1361-6498/abae0e
17. Molokanov A.A., Kukhta B.A., Maksimova E.Yu. Comparative analysis of approaches to regulation and control of personnel internal exposure // *Medical radiology and radiation safety*. 2021; 66 (6): 102-110. doi: 10.12737/1024-6177-2021-66-6-102-110.
18. Clarke R.H., Dunster J., Smith H., et al. The Environmental Safety and Health Implications of Plutonium // *Journal of radiological protection*. 1996; 16 (2): 91-105. doi: 10.1088/0952-4746/16/2/005
19. Abramov Yu. V. [et al.] Ilyin L.A., editors. Plutoniyy. Radiatsionnaya bezopasnost: monograph / under total ed. a. M.: Publishing House. 2005; 415 p.
20. Gosky A.A., Perminova G.S., Stepanov V.S., et al. O normakh radiatsionnoy bezopasnosti NRB-99/2009 // *ANRI*. 2009; 4(59): 18-20.
21. Aumalikova M., Ibrayeva D., Zhumadilov K., et al. Calculation of Radiation Burden of Personnel and Public, Working and Living in Area of the Uranium Mining and Uranium-Processing Enterprises. *Bulletin of L.N. Gumilyov Eurasian National University. Physics. Astronomy Series*. 2019; 2 (127): 38-47. doi: 10.32523/2616-68-36-2019-127-2-38-47
22. Budyka A.K., Kirsch A.A., Ogorodnikov B.I. Filtration and Sampling by Fibrous Filters. *Aerosols Handbook: Measurement, Dosimetry, and Health Effects, Second Edition*. CRC Press. 2012: 439-472 doi: 10.1201/b12668. doi: 10.1201/b12668
23. Stogniy V.I., Devyatkin I.V., Nurlybaev K. Dozimetr-radiometr DKS-96: v nogu so vremenem // *ANRI*. 2008; 4(55): 60-63.

Authors of the publication

Alexander S. Gerasimenko – Branch «Siberian Territorial District» Federal State Unitary Enterprise «Federal Environmental Operator», Irkutsk, Russia

Sergey V. Dorokhov – Branch «Siberian Territorial District» Federal State Unitary Enterprise «Federal Environmental Operator», Irkutsk, Russia

Victoria V. Krivorotova – Branch «Siberian Territorial District» Federal State Unitary Enterprise «Federal Environmental Operator», Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia

Получено 21.04.2022г.

Отредактировано 06.05.2022г.

Принято 06.05.2022г.