

В. В. Левенец, А. Ю. Лонин, А. П. Омельник, В. И. Соколенко, А. А. Щур

Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт», Харьков

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА СОРБЦИОННЫХ СВОЙСТВ УГЛЕРОДНЫХ ФИЛЬТРОВ, ИСПОЛЮЩИХСЯ В СИСТЕМЕ ВЕНТИЛЯЦИИ АЭС, С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ^{131}I И ^{127}I

Проведено сравнение методик для определения сорбционных свойств адсорбента СКТ-ЗИ с использованием ^{131}I и ^{127}I . ^{127}I определялся в углеродной матрице по характеристическому рентгеновскому излучению К-серии атомов йода, возбуждаемому гамма-излучением с энергией 60 кэВ от радиоактивного источника ^{241}Am , ^{131}I определялся по регистрации наведенной гамма-активности с энергией 364 кэВ. Определен коэффициент корреляции для методов, позволяющий утверждать о том, что оба метода дают адекватную оценку сорбционных свойств СКТ-ЗИ. Это дает возможность использовать методику с ^{127}I для оценки коэффициента очистки сорбентов углеродных фильтров, используемых в системах вентиляции на украинских АЭС.

Ключевые слова: вентиляционная система АЭС, йод, углеродный адсорбент, характеристическое рентгеновское излучение.

Введение

В настоящее время перед Украиной стоит важная задача – продление сроков эксплуатации ядерных реакторов на ряде АЭС. Она включает в себя модернизацию оборудования, а также разработку и внедрение методик, необходимых для контроля состояния функциональных и конструктивных материалов АЭС [1]. Одним из этапов является модернизация вентиляционных и воздушно-фильтрующих систем станций. При его выполнении требуется осуществить выбор наиболее эффективных и экономически обоснованных фильтрующих материалов и провести необходимые сертификационные испытания.

К основным радиоактивным компонентам выбросов в атмосферу при работе АЭС относятся изотопы ксенона, криптона, а также пары радиоактивного йода и его различные соединения. Особую опасность представляет ^{131}I и его органические соединения, которые могут активно накапливаться в организме человека. При этом допустимая норма объемной активности йода в помещении АЭС, где постоянно пребывает персонал, составляет $2 \cdot 10^{-12}$ Ки/л, а на один работающий ядерный блок допускается $2 \cdot 10^{-4}$ Ки/сут при выбросе в атмосферу. Из органических соединений йода наибольшую опасность для человека представляет йодистый метил, обладающий канцерогенными свойствами [2].

На энергетических блоках украинских АЭС для поглощения йода и его молекулярных соединений используются фильтры АУ-1500, установленные в вентиляционных системах. Фильтры заполняются адсорбентами, разработанными на основе углеродных матриц. В настоящее время используются адсорбенты СКТ-ЗИ, СКТ-ЗИК,

DGF-2, Norit, Carbotech. При этом используемые адсорбенты делятся на простые и импрегнированные. Поглощение йода на простых адсорбентах происходит за счет поверхностной адсорбции йода и его соединений. При использовании импрегнированных адсорбентов наряду с поверхностной адсорбцией присутствует химическая сорбция, обусловленная заменой стабильного йода в структуре адсорбента на радиоактивный. Адсорбент СКТ-ЗИ импрегнирован ТЭДА (триэтилендиамином – $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{N}_2$, за счет взаимодействия йодистого метила с третичными аминами происходит образование четвертичных аммониевых солей), а СКТ-ЗИК импрегнирован иодид-дiazобиоциклооктаном бария (комплексное соединение $m\text{C}_6\text{H}_{12}\text{N}_2 \cdot n\text{BaI}_2$).

Необходимо учитывать, что все углеродные адсорбенты со временем теряют свои сорбционные качества, явление «старения» углеродных адсорбентов наблюдается даже при прокачке обычного атмосферного воздуха. Это характерно как для обычных углей, так и для импрегнированных. «Старение» обусловлено присутствием в воздухе микропримесей химически активных веществ [3].

Учитывая сложившуюся ситуацию, остро встает вопрос оценки эффективности используемых адсорбентов.

Основным показателем для такой оценки является коэффициент очистки (K), который определяется по отношению концентрации радиоактивного йода на входе в установку ($N_{\text{вх}}$) к концентрации радиоактивного йода на выходе из этой установки ($N_{\text{вых}}$) и вычисляется по формуле

$$K = N_{\text{вх}} / N_{\text{вых}}. \quad (1)$$

© В. В. Левенец, А. Ю. Лонин, А. П. Омельник, В. И. Соколенко, А. А. Щур, 2017

Использование данной методики предполагает использование радиоактивных материалов, что требует обеспечения контроля радиационной безопасности и оформления дополнительных разрешительных документов.

В настоящее время разработана методика, позволяющая использовать единый подход для оценки свойств конкретных адсорбентов. В таком варианте оценка сорбционных свойств адсорбентов проводится по индексу сорбционной способности, который представляет собой тангенс угла наклона прямой (угловой коэффициент), выходящей из начала координат и проходящей через контрольные точки. Индекс сорбционной способности адсорбента α , с^{-1} , вычисляют по формуле

$$\alpha = \frac{1}{\tau} \ln \frac{A}{A - A_{\text{сорб}}}, \quad (2)$$

где τ – время прохождения газовым потоком свободного объема в слое сорбента (условное время контакта), с; вычисляемое по формуле

$$\tau = \frac{V_{\text{св}}}{Q_{\text{кол}}}, \quad (3)$$

где $V_{\text{св}}$ – свободный объем в объеме, занятом сорбентом, см^3 ; $Q_{\text{кол}}$ – объемная скорость газового потока в колонке с испытуемым сорбентом, $\text{см}^3/\text{с}$; A – общая активность ^{131}I , введенная при испытаниях сорбента, равная сумме активностей секций и защитной колонки, Бк; $A_{\text{сорб}}$ – активность ^{131}I в сорбенте, равная сумме активностей секций, Бк.

В соответствии с рекомендациями МАГАТЭ [4, 5] минимальное значение отношений концентрации йодистого метила в воздухе на входе в колонку с адсорбентом к его концентрации на

выходе из колонки $\left(\frac{C_{\text{вх}}}{C_{\text{вых}}}\right)$ должно быть не ме-

нее 100, тогда значение $\ln \frac{C_{\text{вх}}}{C_{\text{вых}}} = \ln \frac{A}{A - A_{\text{сорб}}}$

должно быть не менее 4,605 [6]. Отсюда следует, что адсорбент может быть признан пригодным для использования на АЭС, если индекс его сорбционной способности α не менее 4,605/т.

Данный метод и представленные расчеты позволяют дать полную оценку используемых адсорбентов и оценить эффективность их использования. Но применение при измерениях радиоактивных соединений йода значительно усложняет использование метода, так как необходимы дополнительные меры безопасности и специальные разрешения на работу с радиоак-

тивными материалами. Поэтому в ННЦ ХФТИ была разработана методика, позволяющая проводить аналогичные исследования с использованием стабильных изотопов йода [7].

Целью данной работы являлось сравнение двух методов, позволяющих проводить оценку поглотительных свойств углеродных адсорбентов с использованием стабильного и радиоактивного йода.

Для оценки метода с использованием радиоактивного йода использовались результаты, опубликованные в работах [6, 8, 9].

Оборудование и материалы

Для оценки метода с использованием стабильного йода, разработанного в ННЦ ХФТИ, были использованы следующие результаты.

Методика включает комплекс процедур с использованием 1) модуля прокачки воздуха с парами йода через модель фильтра и 2) модуля количественного определения йода в углеродной матрице.

Модуль прокачки моделирует работу фильтра АУ-1500 системы вентиляции АЭС и является аналогом модуля, применяемого при прокачке радиоактивного йода. Макет адсорбера состоит из 6 герметично соединенных секций диаметром 48 мм и длиной 50 мм и используется для получения данных о распределении йода, поглощенного в активированном угле. Плотность йода в прокачиваемом воздухе можно варьировать температурой генератора йода и величиной потока воздуха через него в интервале $4,7 \cdot 10^{-3} \dots 7 \cdot 10^{-6}$ об. %, что соответствует $(0,55 \dots 4,6) \cdot 10^{-4}$ г/м³. Время прокачки воздуха через макет адсорбера фиксируется. Адсорбционная емкость адсорбента оценивалась исходя из эксплуатации АУ-1500 в штатном режиме работы в течение 30 лет. Так, при потоке воздуха через адсорбер в 1500 м³/ч за 30 лет непрерывной работы через АУ-1500 проходит $3,9 \cdot 10^8$ м³ воздуха, в котором объемная концентрация йода составляет $2 \cdot 10^{-16}$ об. % или $7,8 \cdot 10^{-10}$ м³ паров йода, что соответствует $\sim 8 \cdot 10^{-6}$ г йода. При номинальном потоке воздуха через генератор паров йода макета адсорбера и комнатной температуре плотность йода в потоке вентилируемого воздуха составляет $\sim 0,005$ г/м³. За час через макет адсорбера проходит около 3 м³ воздушной смеси, т. е. $\sim 0,015$ г йода.

Модуль количественного определения йода основан на возбуждении и регистрации характеристического рентгеновского излучения (х.р.и.) К-серии атомов йода. Анализ полученных данных показал [10, 11], что наиболее предпочтительным в рамках поставленной задачи является

использование метода рентгено-радиометрического анализа (РРА). В процессе выполнения работы исследовано влияние характеристик первичного (возбуждающего) излучения на спектр х.р.и. и выбран тип радиоактивного источника (^{241}Am); по результатам исследований функций отклика 10 блоков детектирования с различными типами кристаллов выбран тип блока детектирования х.р.и. в диапазоне 30...40 кэВ [9, 10]; определены рентгенооптическая схема установки и характеристики поглощающих фильтров и коллиматоров; выбраны параметры функционирования спектрометрического тракта.

Результаты и обсуждение

При обсуждении результатов необходимо отметить, что активированные углеродные сорбенты имеют сложный механизм сорбции, включающей в себя адсорбцию и хемосорбцию. Активированные углеродные сорбенты – это высокопористые углеродные материалы, имеющие чрезвычайно развитую внутреннюю поверхность (1000 - 2000 м²/г), которая обусловлена обширной внутренней пористостью, состоящей из макро-, мезо- и микропор. В пористой структуре активного угля (объеме микропор и мезопор) происходит поглощение любых типов органических микропримесей за счет адсорбционных сил (сил поверхностного взаимодействия). Микропоры углеродных адсорбентов имеют щелевидную форму и выражаются их полушириной – x . К микропорам относятся поры с $x < 0,6 - 0,7$ нм, а также более крупные поры ($0,6 - 0,7 < x < 1,5 - 1,6$ нм), называемые супермикропорами. Именно в объеме микропор происходит основное поглощение примесей из очищаемых сред за счет ван-дер-ваальсовых сил неспецифического взаимодействия [12, 13].

Объем мезопор у обычных активированных углей составляет 0,02 - 0,10 см³/г, удельная поверхность – от 20 до 70 м²/г. У некоторых активированных углей, в частности осветляющих, значения этих характеристик могут составлять 0,7 см³/г и 200 - 450 м²/г соответственно. Механизм адсорбции в мезопорах – последовательное образование адсорбционных слоев (полимолекулярная адсорбция), завершающееся их заполнением по механизму капиллярной конденсации.

Макропоры (удельный объем и поверхность 0,2 - 0,8 см³/г и 0,5 - 2,0 м²/г соответственно) служат транспортными каналами, подводящими молекулы поглощаемых веществ к адсорбционному пространству гранул активированного угля (рис. 1).

Хемосорбция у активированных углеродных сорбентов проявляется следующим образом: углеродный сорбент пропитывают неактивными и нелетучими неорганическими соединениями йода (например, йодидом калия), тогда при прохождении радиоактивного йодистого метила происходит обмен изотопами йода, при этом в результате большого избытка нерадиоактивного йода достигается хорошая эффективность обмена [12, 13].

При использовании активного угля, пропитанного третичными аминами, йодистый метил можно связать образованием четвертичных аммониевых солей. Особенно эффективным, благодаря относительно малой, по сравнению с другими аминами, летучести и высокой основности, оказался ТЭДА [12, 13].



Рис.1. Схема проникновения молекул адсорбируемых веществ в поры.

В рамках проводимых исследований в ННЦ ХФТИ были выполнены эксперименты по распределению йода в гранулах некоторых сорбентов. Поверхностное содержание йода определялось на аналитическом ядерно-физическом комплексе (АЯФК) «Сокол» [10]. Возбуждение х.р.и. К-серии йода осуществлялось пучком протонов с энергией 1745 кеВ. При этом глубина анализа не превышала 30 мкм. Эти же объекты были исследованы рентгенрадиометрическим методом, позволяющим определять содержание йода в объеме гранулы. В результате было показано, что распределение йода в отдельных гранулах импрегнированных сорбентов неравномерно; для некоторых сорбентов характерно преимущественное поглощение йода поверхностью гранулы; для статистически верного определения содержания йода необходимо одновременно анализировать не менее 5 г сорбента.

Результаты выполненных экспериментов были использованы при сравнении метрологических характеристик методик: на радиоактивных и стабильных изотопах. По материалам работ [6 -

8, 14] нет достаточной информации для установления четких пределов чувствительности у методики, основанной на поглощении радиоактивного йода. Поэтому для сравнительной оценки чувствительности мы использовали приведенные косвенные характеристики из работы [6]. Скорость газового потока в колонке 15 л/мин. Объемная активность $\text{CH}_3^{131}\text{I}$ в газе составляет от 10^3 до 10^5 Бк/м³, что соответствует массовой концентрации $\text{CH}_3^{131}\text{I}$ в газе от 1 до 20 мг/м³. В случае прокачки $\text{CH}_3^{131}\text{I}$ через сорбционную колонку в течение 3 ч, количество $\text{CH}_3^{131}\text{I}$ составит от 2,7 до 54,0 мг, а масса йода составит от 2,4 до 48,0 мг. Учитывая, что поглощение йода сорбентом 99,9 %, можно говорить о том, что в объеме сорбента после проведения испытаний содержание йода составит от $2 \cdot 10^{-3}$ до $5 \cdot 10^{-2}$ г. При

использовании метода РРА предел обнаружения составляет $4,0 \cdot 10^{-4}$ мас. %, что соответствует содержанию $3,6 \cdot 10^{-6}$ г йода в облучаемой пробе. Из этого следует, что нижний уровень определения массового содержания йода в веществе фильтров при регистрации излучения К-серии атомов стабильного изотопа ^{127}I может быть на 3-4 порядка ниже, чем в случае использования наведенного гамма-излучения.

Для проведения сравнения двух методов использовали результаты определения коэффициента очистки с помощью радиоактивного изотопа и регистрации гамма-линии с энергией 364 кэВ, опубликованные в работе [14]. На их основании были построены графики зависимости активности углеродного сорбента СКТ-3И от номера секции (рис. 2 и 3).

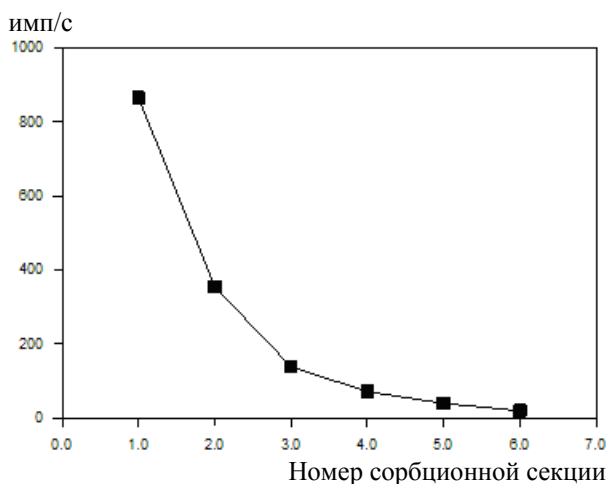


Рис. 2. Зависимость активности углеродного сорбента СКТ-3И от номера секции.

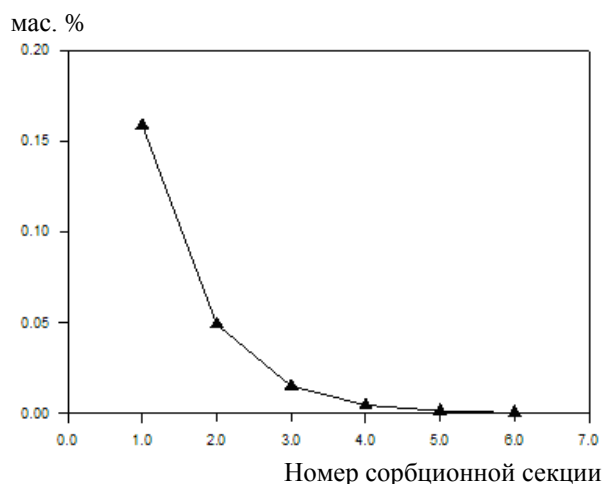


Рис. 3. Зависимость содержания йода в СКТ-3И от номера секции.

На основании полученных данных были проведены расчеты $\ln(C_{\text{вх}} / C_{\text{вых}})$ и индекса сорбционной активности $\alpha = \frac{\ln(C_{\text{вх}} / C_{\text{вых}})}{\tau}$. Результаты для обоих методов представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1. Определение индекса сорбционной активности для СКТ-3И методом с использованием радиоактивного йода при $\tau = 1$ ч

Номер секции	$\ln(C_{\text{вх}} / C_{\text{вых}})$	$\alpha = \frac{\ln(C_{\text{вх}} / C_{\text{вых}})}{\tau}$
2	0,890	0,890
3	1,840	1,840
4	2,500	2,500
5	3,100	3,100
6	3,82	3,82

Таблица 2. Определение индекса сорбционной активности для СКТ-3И методом с использованием стабильного йода при $\tau = 6$ ч

Номер секции	$\ln(C_{\text{вх}} / C_{\text{вых}})$	$\alpha = \frac{\ln(C_{\text{вх}} / C_{\text{вых}})}{\tau}$
2	1,17	0,195
3	2,50	0,417
4	3,52	0,587
5	4,66	0,777
6	5,76	0,96

По полученным данным был произведен расчет коэффициента корреляции, характеризующего степень линейной зависимости между результатами определения коэффициента сорбции стронция различными методами. Он рассчитывался по формуле

$$R_{X,Y} = \frac{\sum_{i=1}^m (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^m (Y_i - \bar{Y})^2}}, \quad (4)$$

где \bar{X} , \bar{Y} - выборочные средние X^m и Y^m .

$R_{x,y}$ составил 0,9991, и это указывает на то, что оба метода позволяют получить адекватную оценку сорбционных свойств СКТ-3И. Это свидетельствует о том, что использование стабильных соединений йода может быть использовано для сертификационной оценки сорбционных свойств углеродных сорбентов.

Выводы

В ходе работы было проведено сравнение методов с использованием стабильного и радиоактивного йода для оценки сорбционных свойств СКТ-3И. Оба метода позволили дать адекватную оценку сорбционных свойств СКТ-3И. Использование стабильного йода расширяет возможности сертификационной оценки сорбционных свойств углеродных сорбентов и моделирования процессов, проходящих в вентиляционных системах АЭС. Использование ^{127}I значительно повышает безопасность проводимых работ и дает возможность использовать методику при проведении работ по модернизации систем вентиляции АЭС.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жолудь А. Развитие Атомной Энергетики в Украине: Маленькие Шаги или Большие Скачки. - Режим доступа: <http://minprom.ua/digest/207495.html>
2. Василенко И. Я. Радиоактивный йод // Энергия: экономика, техника, экология. - 2003. - № 5. - С. 57 - 62.
3. Исследования методов и средств очистки воздушных выбросов от радиоактивных аэрозолей и газов. - Москва: Атомиздат, 1978. - Вып. 5. - 116 с.
4. Testing and Monitoring of Off-gas Cleanup Systems at Nuclear Facilities // Technical Reports Series No. 243. - IAEA, Vienna, 1984.
5. D3803-91(2009). Standard Test Method for Nuclear Grade Activated Carbon // ASTM International. - 2009. - 18 p.
6. Сорбенты йодные для атомных электростанций. Метод определения индекса сорбционной способности: ГОСТ Р 54443-2011. - [Действующий от 01.01.2012]. - Москва, 2011. - 21 с. (Национальный стандарт Российской Федерации).
7. Levenets V.V., Sokolenko V.I., Vinokurov E.I. et al. Determination of the coefficient of iodine absorption carbon materials adsorber ventilation NPP using stable isotopes // PAST. Series: Vacuum, Pure Materials, Superconductors. - 2016. - Iss. 1(101). - P. 56 - 60.
8. Обручиков А.В., Ширков В.В., Растунов Л.Н. Создание контрольно-исследовательского йодного стенда // Успехи в химии и химической технологии. - 2008. - № 8 (88). - С. 9 - 12.
9. Меркушин А.О., Обручиков А.В., Йе Аунг Мин. Сравнительная оценка эффективности улавливания CH_3I композиционным сорбентом на основе пенополиуретана с различными формами углерода // Успехи в химии и химической технологии. - 2013. - № 6. - С. 42 - 46.
10. Омельник А.П., Левенец В.В., Лонин А.Ю., Щур А.А. Сравнение методов определения содержания йода в углероде, основанных на регистрации характеристического рентгеновского излучения // Вопросы атомной науки и техники. - 2015. - № 5(99). Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение (106). - С. 145 - 151.
11. Омельник А.П., Левенец В.В., Лонин А.Ю., Щур А.А. Спектрометрические характеристики различных блоков детектирования при рентгенометрическом определении йода по К-серии с использованием источника ^{241}Am // Методы и объекты химического анализа. - 2015. - Т. 10, № 3. - С. 128 - 134.
12. Мухин В.М., Курилкин А.А., Воропаева Н.Л. и др. Место активных углей в экологии и экономике, новые технологии их производства // Сорбционные и хроматографические процессы. - 2016. - Т. 16, № 3. - С. 346 - 353.
13. Кельцев Н.В. Основы адсорбционной техники. — Москва: Химия, 1976. - 511 с.
14. Wilhelm J.G. Iodine filters in nuclear installations. Contract No. 1175-80-12L/V. - Commission of the European Communities, 1982. - 209 p. - Access mode: www.bookshop.europa.eu/.../iodine-filters-in-nuclear-installations.../XK0211000ENC_0...
15. Обручиков А.В., Меркушин А.О. Улавливание радиоактивного метилиодида композиционным сорбентом на основе пенополиуретана // Научно-практическая конференция «Экология и безопасность в техносфере: современные проблемы и пути решения». - Юрга, 2013. - С. 18 - 21.

В. В. Левенец, О. Ю. Лонин, О. П. Омельник, В. И. Соколенко, А. О. Щур

Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут», Харків

**ПОРІВНЯЛЬНА ОЦІНКА СОРБЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВУГЛЕЦЕВИХ ФІЛЬТРІВ,
ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ В СИСТЕМІ ВЕНТИЛЯЦІЇ АЕС,
З ВИКОРИСТАННЯМ ^{131}I ТА ^{127}I**

Проведено порівняння методик для визначення сорбційних властивостей адсорбенту СКТ-3І із використанням ^{131}I і ^{127}I . ^{127}I визначався у вуглецевій матриці за характеристичним рентгенівським випромінюванням К-серії атомів йоду, що порушується гамма-випромінюванням з енергією 60 кеВ від радіоактивного джерела ^{241}Am ; ^{131}I визначався за реєстрацією гамма-ліній з енергією 364 кеВ. Визначено коефіцієнт кореляції для методів, що дозволяє стверджувати про те, що обидва методи дають адекватну оцінку сорбційних властивостей СКТ-3І. Це дає можливість використовувати методику з ^{127}I для оцінки коефіцієнта очищення сорбентів вуглецевих фільтрів, що використовуються в системах вентиляції на українських АЕС.

Ключові слова: вентиляційна система АЕС, йод, вуглецевий адсорбент, характеристичне рентгенівське випромінювання.

V. V. Levenets, A. Yu. Lonin, A. P. Omelnik, V. I. Sokolenko, A. O. Shchur

National Science Center "Kharkov Institute of Physics and Technology", Kharkiv

**COMPARATIVE ASSESSMENT OF THE SORPTION PROPERTIES OF CARBON FILTERS
USED IN THE VENTILATION SYSTEM OF NPP, USING ^{131}I AND ^{127}I**

Comparison of the methods for determining sorption properties of the SKT-3I adsorbent using ^{131}I and ^{127}I were carried out. ^{127}I was determined in the carbon matrix by the characteristic X-ray emission of the K-series of iodine atoms excited by gamma radiation with an energy of 60 keV from the radioactive source ^{241}Am . ^{131}I was determined by the registration of the gamma lines with energy of 364 keV. The correlation coefficient was determined for these methods, which allowed asserting that both methods give an adequate estimation of the sorption properties of SKT-3I. This makes it possible to use the method with ^{127}I to estimate the sorbents purification coefficient of carbon filters used in ventilation systems at Ukrainian NPPs.

Keywords: NPPs ventilation system, iodine, carbon adsorbent, characteristic X-ray radiation.

REFERENCES

1. Zholud' A. Development of Atomic Energy in Ukraine: Small Steps or Big leaps. - Access mode: <http://minprom.ua/digest/207495.html> (Rus)
2. Vasilenko I.Ya. // Energiya: ekonomika, tekhnika, ekologiya. - 2003. - No. 5. - P. 57 - 62. (Rus)
3. Studies of methods and means for cleaning air emissions from radioactive aerosols and gases. - Moskva: Atomizdat, 1978. - Iss. 5. - 116 p. (Rus)
4. Testing and Monitoring of Off-gas Cleanup Systems at Nuclear Facilities // Technical Reports Series No. 243. - IAEA, Vienna, 1984.
5. D3803-91(2009). Standard Test Method for Nuclear Grade Activated Carbon // ASTM International. - 2009. - 18 p.
6. Sorbents for trapping radioiodine at nuclear power stations. Method for determination of sorption capacity index: State standard ГОСТ Р 54443-2011. - [Valid from 01.01.2012]. - Moskva, 2011. - 21 p. (The National Standard of the Russian Federation). (Rus)
7. Levenets V.V., Sokolenko V.I., Vinokurov E.I. et al. Determination of the coefficient of iodine absorption carbon materials adsorber ventilation NPP using stable isotopes // PAST. Series: Vacuum, Pure Materials, Superconductors. - 2016. - Iss. 1(101). - P. 56 - 60.
8. Obruchikov A.V., Shirkov V.V., Rastunov L.N. // Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii. - 2008. - No. 8 (88). - P. 9 - 12. (Rus)
9. Merkushev A.O., Obruchikov A.V., Je Aung Min. // Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii. - 2013. - No. 6. - P. 42 - 46. (Rus)
10. Omel'nik A.P., Levenets V.V., Lonin A.Yu., Shchur A.A. // Voprosy atomnoj nauki i tekhniki. - 2015. - No. 5(99). Seriya: Fizika radiatsionnykh povrezhdenij i radiatsionnoe materialovedenie (106). - P. 145 - 151. (Rus)
11. Omel'nik A.P., Levenets V.V., Lonin A.Yu., Shchur A.A. // Metody i ob'ekty khimicheskogo analiza. - 2015. - Vol. 10, No. 3. - P. 128 - 134. (Rus)
12. Mukhin V.M., Kurilkin A.A., Voropaeva N.L. i dr. // Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy. - 2016. - Vol. 16, No. 3. - P. 346 - 353. (Rus)
13. Keltsev N.V. Basics of adsorption technique. - Moskva: Khimiya, 1976. - 511 p. (Rus)
14. Wilhelm J.G. Iodine filters in nuclear installations. Contract No. 1175-80-12L/V. - Commission of the European Communities, 1982. - 209 p. - Access mode: www.bookshop.europa.eu/.../iodine-filters-in-nuclear-installations.../XK0211000ENC_0...
15. Obruchikov A.V., Merkushev A.O. The capture of radioactive methyl iodide by a composite sorbent based on polyurethane foam // Scientific and practical conference "Ecology and safety in the technosphere: modern problems and solutions". - Yurga, 2013. - P. 18 - 21. (Rus)

Надійшла 24.04.2017
Received 24.04.2017