

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗОНАНСНЫХ НЕЙТРОНОВ ДЛЯ ЭЛЕМЕНТНОГО АНАЛИЗА ДЕТАЛЕЙ ДВИГАТЕЛЯ РАКЕТЫ «ПРОТОН»

*Д. Н. Грозданов^{a, б}, Н. А. Федоров^{a, в}, Ф. А. Алиев^{a, з},
В. М. Быстрицкий^a, Ю. Н. Копач^a, И. Н. Русков^{a, б},
П. В. Седышев^a, В. Р. Ской^{a, 1}, В. Н. Швецов^a,
А. В. Бараев^д, А. В. Кологов^д*

^a Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

^б Институт ядерных исследований и ядерной энергетики
Болгарской академии наук, София

^в Московский государственный университет
им. М. В. Ломоносова, Москва

^з Институт геологии и геофизики
Национальной академии наук Азербайджана, Баку

^д НПО «Техномаш», Москва

В ЛНФ ОИЯИ на импульсном нейтронном источнике ИРЕН проводятся исследования нейтрон-ядерных взаимодействий в фундаментальных и прикладных целях. К последним, в частности, относится элементный анализ материалов и узлов, входящих в состав конструкций различных устройств. В настоящей работе описана методика измерения и результаты количественного определения содержания палладия в элементах конструкции двигателя ракеты «Протон». Показано, что метод нейтронного резонансного анализа элементного состава образцов в его нынешней реализации на установке «Ромашка» позволяет уверенно определять содержание палладия на уровне 2 мг/г для образцов массой порядка 60 г. Дальнейшее развитие метода позволит повысить его чувствительность и проводить элементный анализ более крупных деталей и их сборок.

The IREN neutron source (FLNP, JINR) provides neutron-nuclear research for both fundamental and applied purposes. The latter include an element analysis of materials and parts of different devices. The present paper describes a method of measurement and the results of quantitative analysis of palladium presence in the parts of “Proton” rocket engine. It is shown that the given method of neutron resonance analysis provided by “Romashka” installation allows determination of palladium quantity at the level of 2 mg/g for the samples of the order of 60 g. Further development of the method will gain its sensitivity and allows one to analyze bigger parts and their assemblies.

PACS: 29.25.Dz; 29.30.Kv; 29.40.Mc; 29.85.Fj; 29.85.Ca

¹E-mail: skoy@nf.jinr.ru

ВВЕДЕНИЕ

В ЛНФ ОИЯИ работает импульсный источник резонансных нейтронов ИРЕН на базе ускорителя электронов с неразмножающей нейтронопроизводящей мишенью [1–3]. Импульсный характер источника позволяет использовать методику времени пролета (TOF) для определения энергии нейтронов и зависящих от нее сечений нейтрон-ядерных взаимодействий и связанных с ними величин. В частности, с помощью данной методики по характеристическим нейтронным резонансам можно определять элементный и изотопный состав исследуемых образцов [4]. Сечения взаимодействия нейтронов с веществами в области энергий нейтронов от долей эВ до сотен кэВ имеют ярко выраженную резонансную структуру, причем положение нейтронных резонансов, а также их интенсивность и площадь под резонансом индивидуальны для каждого изотопа. Это позволяет идентифицировать различные элементы, а также их изотопы с высокой точностью. Чувствительность метода различна для разных элементов и зависит от наличия резонансов в нужной области энергий нейтронов, величины нейтронного сечения в области резонансов, наличия в этой же области энергий фоновых резонансов от других элементов и т. п. Проникающая способность нейтронов довольно высока, поэтому резонансный метод изотопной идентификации позволяет анализировать достаточно массивные образцы и, как правило, не требует их специальной подготовки.

В данной работе приводятся результаты применения описанного метода для определения количества палладия (Pd) в припое, которым соединяются некоторые узлы ракетного двигателя. Палладий является одним из химических элементов, для которого применимость резонансного метода целесообразна, так как в его нейтрон-ядерном сечении в диапазоне энергий до 100 эВ, где чувствительность метода относительно высока, присутствуют достаточно сильные резонансы. Это обстоятельство позволяет определять наличие палладия даже в весьма небольших количествах в образце.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Измерительная установка «Ромашка» состоит из 24 сцинтилляционных детекторов γ -квантов на основе кристаллов NaI(Tl), которые симметрично располагаются на оси нейтронного пучка [5]. «Ромашка» была установлена на времяпролетной базе 11,4 м 4-го

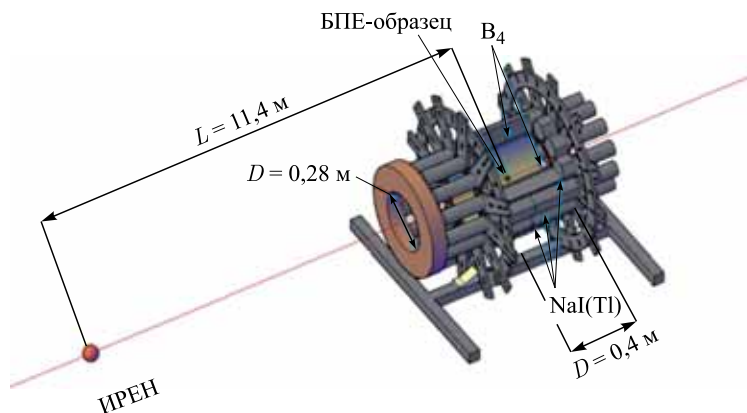


Рис. 1. Схема эксперимента и «Ромашка»

пучка нейтронов в экспериментальном зале ИРЕН. Для формирования пучка нейтронов, падающих на исследуемый образец, применялся входной коллиматор из борированного полиэтилена (БПЕ) толщиной 10 см. Чтобы предотвратить попадание нейтронов, рассеянных на образце, в детекторы, вокруг образца был установлен дополнительный кольцевой экран толщиной 10 мм из карбида бора (B_4C) с обогащением по ^{10}B 94%. Схема установки представлена на рис. 1.

Регистрирующая электроника включала 16-канальный аналого-цифровой преобразователь (АЦП), конструктивно выполненный в виде двух плат в стандарте PCI, позволяющий его установку в разъем персонального компьютера и работу под его управлением с использованием шины PCI-E для обмена информацией [6].

2. ИЗМЕРЯЕМЫЕ ОБРАЗЦЫ

Образцом являлся элемент ракетного двигателя, предоставленный «Роскосмосом», массой около 120 г, впоследствии распиленный на две примерно равные части (рис. 2). Наличие Pd в припое только одной из этих частей (массой ~ 60 г) было предварительно установлено с помощью рентгенофлуоресцентного анализа, выполненного в Институте физико-технических проблем (ИФТП).

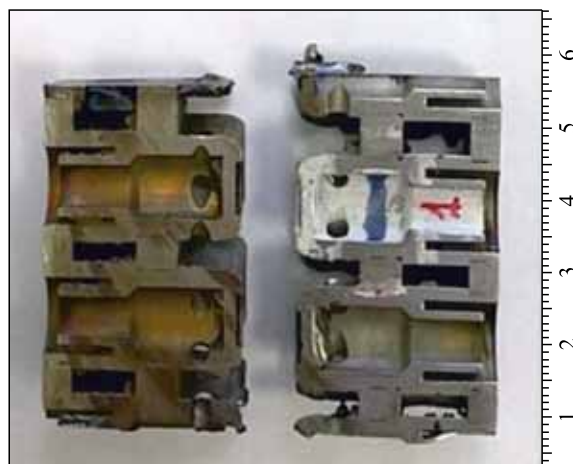


Рис. 2. Элементы ракетного двигателя, использовавшиеся в качестве исследуемых образцов. Цифрой «1» на правой половинке указано место, где по данным рентгенофлуоресцентного анализа обнаружен Pd. В левой половинке Pd нет

В качестве контрольного образца для определения количественного содержания Pd в припое использовалась фольга из естественной смеси изотопов палладия массой 5 г.

3. ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ КАЛИБРОВКА ВРЕМЯПРОЛЕТНЫХ СПЕКТРОВ

Для калибровки времяпролетных спектров использовался контрольный образец Pd массой 5 г. На рис. 3 представлены времяпролетные спектры нейтронов и приведены значения энергий резонансных нейтронов, соответствующие положениям пиков.

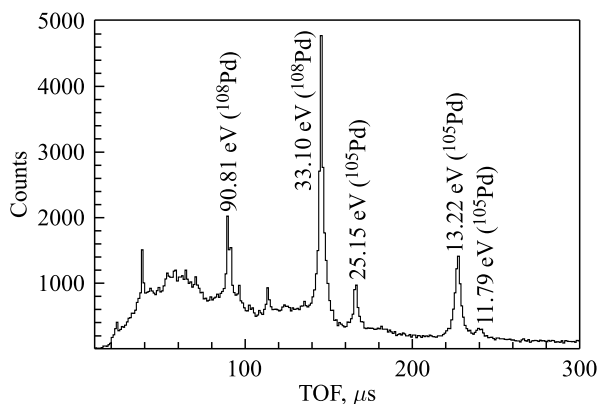


Рис. 3. Времяпролетный спектр, измеренный с контрольным образцом из Pd

Значения энергий нейтронов при радиационном резонансном захвате их ядрами изотопа ^{105}Pd составляют 11,79, 13,22, 25,15, 55,21 и 77,71 эВ, а при захвате нейтронов ядрами изотопа ^{108}Pd — 33,10 и 90,81 эВ.

4. ИЗМЕРЕНИЯ С ИССЛЕДУЕМЫМИ ОБРАЗЦАМИ

Измерения с каждым из образцов проводились в течение 45 ч, с фольгой из палладия массой 5 г — 1 ч. Средняя интенсивность нейтронного источника ИРЕН составляла $\sim 3 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$, длительность нейтронного импульса ~ 100 нс. Результаты измерений представлены на рис. 4–6 для совпадений сигналов γ -детекторов разной кратности.

Спектры, очерченные сплошными линиями, измерены с деталью без палладия (левой на рис. 2). Штриховые кривые получены при облучении нейтронами образца с палладием (правого на рис. 2). Пунктирные кривые — спектр, измеренный с контрольным образцом Pd. Фоновая подложка на рис. 4, 5 обусловлена в основном резонансным радиационным захватом рассеянных образцом нейтронов ядрами йода в самом веществе детектора. Например, самый сильный резонанс палладия 33,10 эВ (^{108}Pd) маскируется

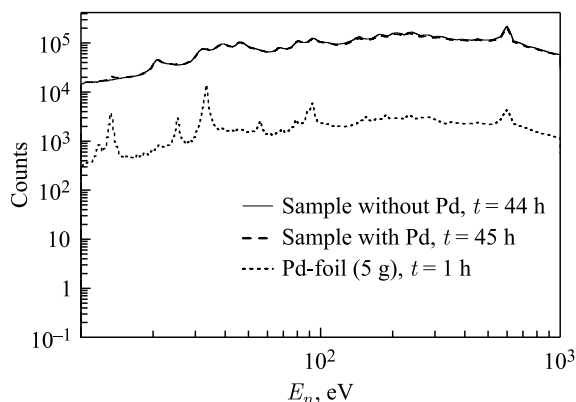


Рис. 4. Энергетические спектры в диапазоне энергий нейтронов 9–1000 эВ, соответствующие полному числу отсчетов всеми 24 детекторами установки «Ромашка»

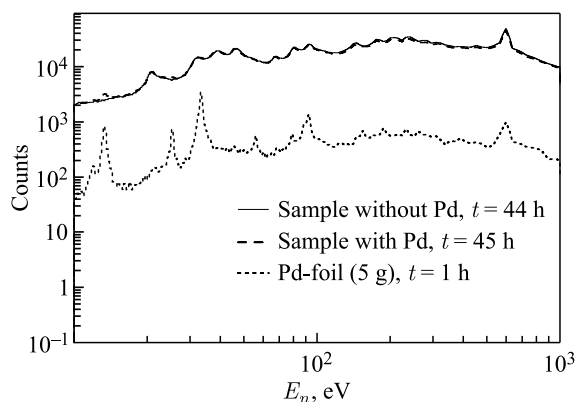


Рис. 5. Энергетические спектры в диапазоне энергий нейтронов 9–1000 эВ, соответствующие пятикратным совпадениям между любыми 5 из 24 детекторов

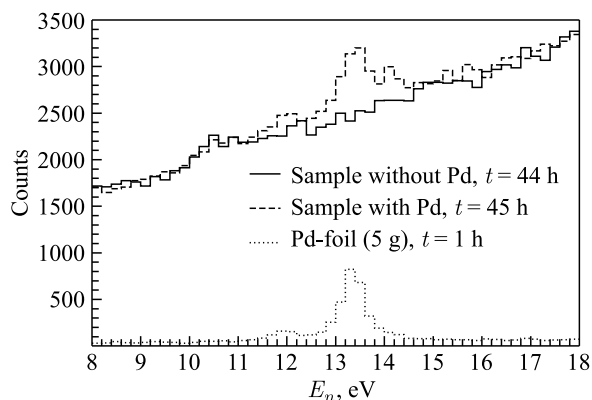


Рис. 6. Энергетический спектр, соответствующий рис.5, построенный для диапазона энергий нейтронов 8–18 эВ

эффектом от резонанса 31,25 эВ (^{127}I). Это осложняет анализ, но тем не менее палладий в образце уверенно идентифицируется по резонансам 13,22 и 25,15 эВ. Видно, что повышение кратности совпадений улучшает соотношение пик–подложка (эффект–фон), но уменьшает статистику. Поэтому для окончательной обработки выбирались совпадения с кратностью от 3 до 7.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Из полученных спектров было определено содержание Pd в образце массой 60 г (правый на рис. 2) по выходу γ -квантов в резонансе 13,22 эВ изотопа ^{105}Pd . Для корректной оценки количества палладия в данном образце все полученные спектры были отнормированы на время измерений. На рис. 7, а приведен разностный спектр: из спектра, соответствующего половине детали узла ракеты с Pd, вычитался поканально спектр, соответствующий половине детали без Pd.

Разностный спектр, приведенный на рис. 7, а, в области пика аппроксимировался суперпозицией линейной функции и функции Гаусса. Аналогичная процедура выполнена

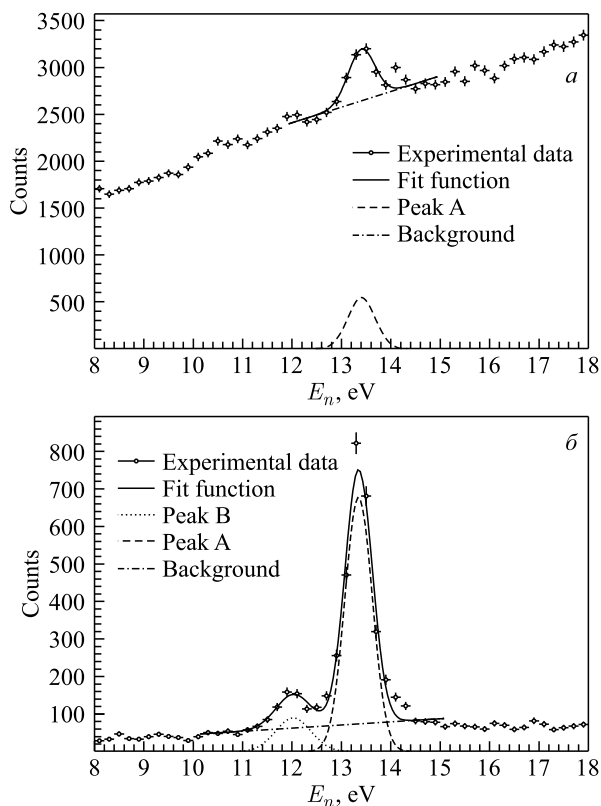


Рис. 7. Спектры, соответствующие двум половинам элемента двигателя (а) и с фольгой из Pd (б). Пояснения см. в тексте

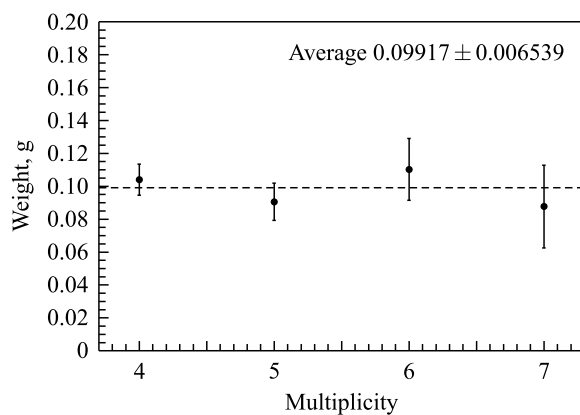


Рис. 8. Значения массы Pd в образце, полученные из спектров совпадений кратности от 4 до 7, и средневзвешенное значение массы Pd (штриховая линия)

для спектра, измеренного с фольгой из Pd (рис. 7, б). Кривая «Peak A» на рис. 7, б соответствует радиационному захвату нейтронов ядрами изотопа ^{105}Pd с энергией 13,22 эВ, а кривая «Peak B» — резонансному захвату нейтронов с энергией 11,79 эВ. После вычисления площадей под пиками на рис. 7, а, б определялось содержание Pd в половине элемента двигателя с использованием известной массы палладиевой фольги.

Значения массы Pd в исследуемом образце для совпадений кратности от 4 до 7 показаны на рис. 8. Полученное среднее значение массы Pd в элементе 1 (рис. 2) двигателя ракеты составило $m_{\text{Pd}} = (0,099 \pm 0,007)$ г (среднее арифметическое по кратностям совпадений от 4 до 7). Систематическая ошибка оценена как наибольшее отклонение измеренных значений массы Pd, полученных для отдельных множественностей, от среднего значения m_{Pd} и составляет $\sim 0,015$ г.

Таким образом, чувствительность метода использования резонансных нейтронов для элементного анализа различных конструкций в настоящем исполнении составляет ~ 2 мг/г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

В настоящей работе на примере палладия продемонстрирована практическая применимость нейтронного резонансного метода для элементного анализа образцов, в том числе и на готовых технических изделиях. Показано, что в нынешнем виде методика позволяет надежно диагностировать количество палладия в образцах массой ~ 60 г на уровне 0,1 г. Следующим шагом может стать исследование более крупных деталей и их сборок. Максимальный размер технических изделий, пригодных для анализа, видимо, будет ограничиваться как размерами измерительной установки, так и фоновыми условиями измерений. Кроме того, детекторы экспериментальной установки не должны содержать элементы, нейтронные резонансы для которых перекрываются с резонансами искомого элемента в образце.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Belikov O. V., Belozerov A. V., Becher Yu. et al.* Physical Start-Up of the First Stage of IREN Facility // J. Phys.: Conf. Ser. 2010. V. 205. P. 012053.
2. *Голубков Е. А., Кобец В. В., Минашкин В. Ф. и др.* Первые результаты наладки второй ускоряющей секции ускорителя ЛУЭ-200 установки ИРЕН. Сообщ. ОИЯИ Р9-2017-77. Дубна, 2017.
3. Источник резонансных нейтронов (ИРЕН). <http://fnph.jinr.ru/ru/facilities/iren>.
4. *Bazhazhina N. V., Mareev Yu. D., Pikelner L. B. et al.* Analysis of Element and Isotope Composition of Samples by Neutron Spectroscopy at the IREN Facility // Phys. Part. Nucl. Lett. 2015. V. 12. P. 578–583.
5. *Ruskov I., Kopach Yu. N., Skoy V. R. et al.* A Multi-Detector NaI(Tl) Gamma-Ray Spectrometry System for Investigation of Neutron Induced Capture and Fission Reactions // Phys. Proc. 2014. V. 59. P. 107–113.
6. ADCM16 — A 16-Channel, 14-Bit, 100 MHz, ADC Board with Signal Processing Core. <http://afi.jinr.ru/ADCM16-LTC>.

Получено 19 марта 2018 г.