

ПНЕВМОТРАНСПОРТНАЯ СИСТЕМА РЕГАТА-2 ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ АКТИВАЦИОННОГО АНАЛИЗА НА УСТАНОВКЕ ИРЕН В ЛНФ ОИЯИ

*В. В. Лобачев^а, А. Ю. Дмитриев^{а,1}, С. Б. Борзаков^{а,б}, А. А. Смирнов^а,
И. С. Жиронкин^а, Е. А. Голубков^а, В. Н. Швецов^а*

^а Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

^б Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия

Установка ИРЕН в Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка (ЛНФ) Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ) используется для проведения экспериментов по определению элементного состава образцов различного происхождения методом нейтронного активационного анализа (НАА). Для автоматизации доставки контейнеров с исследуемыми образцами на позицию облучения и обратно была внедрена пневмотранспортная система (ПТС) РЕГАТА-2. В работе описаны характеристики ПТС, ее адаптация для эксплуатации на установке ИРЕН, а также планы последующей модернизации и дальнейшие перспективы.

После монтажа системы были подобраны оптимальные параметры облучения образцов, построена калибровка для полупроводникового детектора из высокочистого германия, позволяющая учесть объемный характер образцов. С помощью ПТС были исследованы образцы археологической керамики из Казахстана.

Конструкционные особенности установки ИРЕН позволяют использовать не только нейтронно-, но и гамма-производящую мишень. Были проведены первые эксперименты по качественному определению элементов методом гамма-активационного анализа (ГАА), подтверждены перспективы использования установки для этих целей.

Создание ПТС позволило автоматизировать процесс облучения образцов и тем самым повысить эффективность исследований при проведении НАА и ГАА, особенно для короткоживущих изотопов, а также сократить негативное воздействие радиации на организм человека.

The IREN facility at the Frank Laboratory of Neutron Physics (FLNP) of the Joint Institute for Nuclear Research (JINR) is used for experiments to determine elemental composition of various samples by neutron activation analysis (NAA). A pneumatic transport system (PTS) REGATA-2 was implemented to automate the delivery of containers with samples to the irradiation position and back. The article describes the characteristics of the PTS, its adaptation for operation at the IREN facility, and also plans for subsequent modernization and future prospects.

After the assembling of the system, the optimal parameters were chosen for irradiating the typical samples, and a calibration was created for a high-purity germanium detector, which allows one to consider the volume nature of the samples. Samples of archaeological ceramics from Kazakhstan were studied using the PTS.

¹E-mail: andmitriev@jinr.ru

The features of the IREN facility allow one to use not only a neutron, but also a gamma-producing target. The first experiments on the qualitative determination of elements by gamma-activation analysis (GAA) were carried out, and the prospects for using the facility for these purposes were confirmed.

The creation of the PTS made it possible to automate the process of irradiation samples and increase the efficiency of research in NAA and GAA, especially for short-lived isotopes. It also reduced the negative impact of radiation on the human body.

PACS: 03.65.Wj; 61.05.fg

КОМПОНЕНТЫ ПНЕВМОТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ РЕГАТА-2

На установке ИРЕН [1] используется ускоритель электронов ЛУЭ-200 и в зависимости от типа используемой мишени имеется возможность получать нейтроны или гамма-кванты. Энергия электронов достигает в настоящее время 120 МэВ. Установка работает в импульсном режиме с частотой посылок 25 или 50 Гц при среднем токе 5 мкА.

Нейтронопроизводящая мишень представляет собой цилиндр из сплава на основе вольфрама ВНЖ-90 диаметром 40 мм и высотой 100 мм, размещенный внутри алюминиевого бачка диаметром 160 мм, через который прокачивается дистиллированная вода из замкнутого контура для охлаждения мишени и замедления нейтронов. Гамма-производящая мишень представляет собой пластину из того же сплава толщиной 3 мм.

Для прикладного использования полученных нейтронных или фотонных потоков на Базе развития и внедрения Болгарской академии наук была разработана пневмотранспортная система РЕГАТА-2. Проект размещения ПТС в помещениях установки ИРЕН был создан в АО «ВНИПИЭТ».

Основная цель ПТС — доставка контейнера с исследуемым образцом в зону облучения и обратно. Время обратной доставки должно быть минимальным, чтобы позволить проводить исследования по короткоживущим изотопам. При этом важно отметить, что время самого облучения должно быть ограничено только работой ускорителя.

На рис. 1 показаны основные компоненты ПТС. Система состоит из бокса с погрузо-разгрузочной станцией. От бокса отходит полиэтиленовый транспортный канал протяженностью около 40 м. Транспортный канал разделяется коммутаторами на три канала, которые заходят в мишенный зал и заканчиваются каналами для облучения из нержавеющей стали. Два канала, N1 и N2, предназначены для облучения в потоке нейтронов, канал G позволяет работать с гамма-квантами. Каналы крепятся на ферму, где расположен замедлитель нейтронов.

Полиэтиленовый контейнер высотой 42,5 мм, внутренним диаметром 17,4 мм, наружным диаметром 24 мм перемещают по транспортным каналам с помощью сжатого воздуха. Для устойчивой работы ПТС разработчиком был рекомендован компрессор с ресивером объемом 500 л с рабочим давлением 5 бар. В ходе пусконаладочных работ было установлено, что ресивера в 80 л достаточно для стабильной работы системы. Отвод отработанного воздуха из транспортной системы осуществляется главным распределителем и выпускным магнитовентилем в специальную вентиляцию.

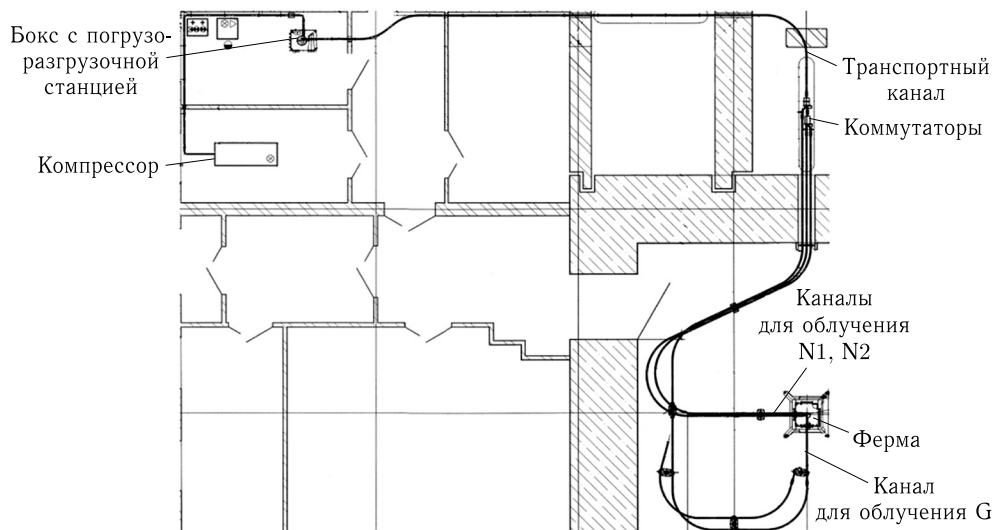


Рис. 1. Общая схема пневмотранспортной системы REGATA-2 на установке ИРЕН

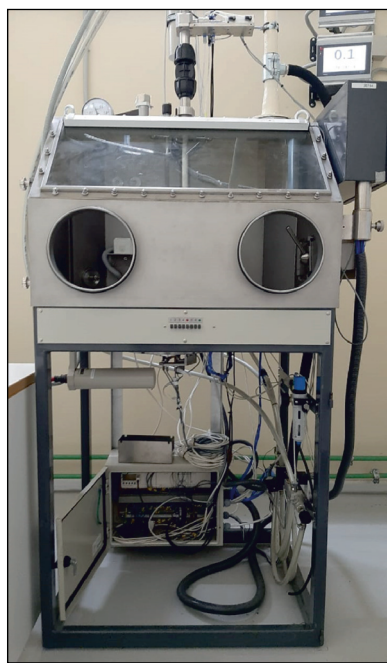


Рис. 2. Бокс с погрузо-разгрузочной станцией

Во время пусконаладочных работ была выявлена проблема перегрева катушки магнитовентилля при длительном (свыше 30 мин) облучении образца. Перегрев катушки не позволял вернуть контейнер в штатном режиме. Проблема была решена посредством переработки программы управления. Сейчас время облучения не ограничено.

Бокс расположен на раме (рис. 2), внутри которой размещены управляющие контроллеры, некоторые пневматические компоненты ПТС и проботека. Проботека служит для временного хранения высокоактивных контейнеров. Она представляет собой алюминиевый диск с шестью ячейками для контейнеров. Со всех сторон диск окружен свинцовой защитой толщиной 50 мм. Номер текущей ячейки виден через информационное отверстие. Над проботеккой находятся два отверстия — входное и выходное. Выходное отверстие служит для извлечения контейнера специальным захватом. Проботека управляется с помощью пульта, находящегося над дверью рамы.

В погрузо-разгрузочной станции имеются следующие датчики состояния:

- 1) оптический датчик положения, который регистрирует наличие контейнера в погрузо-разгрузочной камере;
- 2) индукционный датчик положения дверцы камеры, который дает разрешительный сигнал для работы в случае, если дверца закрыта;

3) индукционный датчик положения ручного крана для перемещения пробы в проботеку; в нормальном состоянии ручной кран должен быть закрыт, в противном случае индукционный датчик не даст разрешительный сигнал для работы.

Пульт управления находится рядом с боксом. В него сведены кабели для передачи всех контрольных и управляющих сигналов ПТС. Отдельный светодиод свидетельствует о достаточном давлении сжатого воздуха. Чтобы отправить контейнер с образцом на позицию облучения, нужно, чтобы были выполнены три условия: в камере есть контейнер, дверца камеры и ручной кран закрыты. Посредством кнопок N1, N2 или G экспериментатор выбирает необходимый канал для облучения, о чем сигнализируют соответствующие светодиоды. При прохождении пробы по транспортным каналам светодиоды меняют цвет. Включение последнего светодиода показывает, что контейнер достиг выбранной позиции облучения. При возвращении контейнер останавливается у дозиметрического поста для контроля наведенной активности. Далее экспериментатор перемещает его в погрузоразгрузочную станцию. Из станции контейнер можно извлечь для дальнейшей работы либо отправить в проботеку для временного хранения. Также на пульте находится аварийный выключатель. С его помощью отключают электропитание системы в случае необходимости.

Управление транспортной системой выполнено на базе двух программируемых контроллеров серии ZELIO SCHNEIDER. Транспортной системой управляют с помощью контроллера SR3 с расширительным модулем С, проботеккой — контроллером SR2. Контроллеры располагаются в электрощкафу вместе с клеммными рядами. К клеммным рядам подсоединены сигнальные кабели от датчиков ПТС. Для программирования контроллеров используют язык программирования релейно-лестничной логики Ladder diagram (LD). В этом языке можно выделить два основных компонента: контакт и катушка. Контакт может быть нормально замкнут и нормально разомкнут. Из этих контактов составляются логические цепочки, результат работы которых передают в целевые переменные, называемые катушками.

Непосредственно над боксом располагается дозиметрический пост (рис. 3). Его основная часть — это стоппер, который автоматически перекрывает трубопровод после пуска контейнера в зону облучения и останавливает каждую облученную пробу при ее возвращении в бокс. Для измерения наведенной активности возле стоппера был установлен дозиметр, показания которого выведены на дисплей. По этим данным экспериментатор принимает решение о дальнейших действиях с образцом: извлечь его для работы или отправить на временное хранение в проботеку. Отдельный датчик сигнализирует о наличии контейнера в стоппере. Изначально был использован отражательный оптический датчик, аналогичный расположенным на коммутаторах и в мишенном зале. Но ввиду того, что проба на данном участке двигалась очень быстро, отражательный датчик работал нестабильно и был заменен датчиком барьерного типа, для которого в цехе опытно-экспериментального производства ЛНФ изготовили дополнительные детали крепления.

Перед входом в мишенный зал транспортный канал разветвляется на три канала с помощью коммутаторов (рис. 4), которые представляют собой пневматические «стрелки», определяющие дальнейший путь контейнера. Коммутаторы приводятся в движение пневматическими цилиндрами. Рядом с цилиндрами расположены оптические датчики. Показания этих датчиков выведены на пульт управления, что позволяет экспериментатору следить за текущим положением контейнера. Первый коммутатор



Рис. 3. Дозиметрический пост



Рис. 4. Коммутаторы

ответвляет трубопровод, который ведет к горизонтальному каналу облучения G. Второй разделяет вертикальные каналы N1 и N2.

Далее три транспортных канала входят через отверстия в стене в мишенный зал (рис. 5), где закрепляются на поддерживающих колоннах. Транспортные каналы заканчиваются каналами для облучения, сделанными из нержавеющей стали. Каналы для облучения позиционированы вплотную к замедлителю нейтронов.

Авторам было необходимо решить проблему с датчиком наличия контейнера на позиции облучения. Все использованные типы датчиков при их размещении в непо-

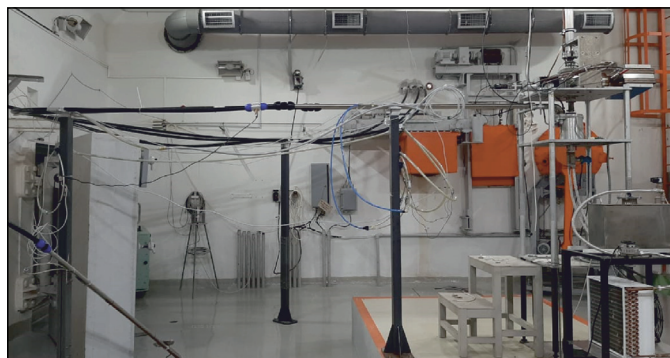


Рис. 5. Мишенный зал

средственной близости от места облучения выходили из строя за короткие промежутки времени. Было предложено подавать сигнал отражательным оптическим датчиком в тот момент, когда контейнер находится примерно в 1,5 м от позиции облучения. Время прохождения контейнера по этому участку по сравнению со всей трассой очень мало. В программу контроллера управления движением контейнера были внесены изменения, в соответствии с которыми подача воздуха продолжалась 1 с после срабатывания описываемого датчика. Для установки датчика в конструкторском бюро (КБ) ЛНФ была разработана специальная муфта, куда помещают сам датчик и отражающий элемент. Эксплуатация созданной конструкции показала отличные результаты, в том числе и по радиационной стойкости: первый датчик проработал свыше 6 мес.

Каналы для облучения закрепляются на регулируемой конструкции, называемой фермой. В силу некоторых обстоятельств болгарская ферма не была введена в эксплуатацию, поэтому конструкция для фиксации каналов была доработана под используемую стойку. У этой стойки отсутствовала опорная балка, что не давало возмож-



Рис. 6. Фиксация к стойке каналов для облучения

Таблица 1. Поток тепловых $\Phi_{\text{тепл}}$ и резонансных $\Phi_{\text{резонанс}}$ нейтронов

Частота, Гц	Высота, см	Масса Си, г	Масса Си в оболочке из Cd, г	$\Phi_{\text{тепл}}, 10^7 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	$\Phi_{\text{резонанс}}, 10^7 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$
25	1	0,340	0,340	$2,57 \pm 0,08$	$1,00 \pm 0,03$
	3	0,326	0,340	$5,69 \pm 0,16$	$1,32 \pm 0,04$
	5	0,336	0,339	$7,46 \pm 0,21$	$1,29 \pm 0,04$
	7	0,343	0,350	$6,64 \pm 0,19$	$1,25 \pm 0,04$
	9	0,338	0,345	$5,30 \pm 0,16$	$1,12 \pm 0,04$
50	1	0,236	0,220	$7,17 \pm 0,22$	$2,42 \pm 0,08$
	3	0,228	0,246	$17,2 \pm 0,5$	$3,14 \pm 0,10$
	5	0,240	0,252	$20,6 \pm 0,6$	$3,57 \pm 0,11$
	7	0,233	0,234	$19,6 \pm 0,6$	$3,34 \pm 0,10$
	9	0,238	0,235	$17,8 \pm 0,9$	$3,04 \pm 0,10$

ности надежно зафиксировать каналы для облучения. Специально для этого в КБ ЛНФ была разработана опорная конструкция, которую реализовали в цехе опытно-экспериментального производства. Данная конструкция фиксирует каналы облучения N1 и N2 таким образом, чтобы облучаемый образец в контейнере был на высоте около 5 см от поверхности мишени (рис. 6).

Указанное выше значение было определено экспериментальным путем. Так как поток нейтронов, вылетающих из мишени, неравномерен по высоте замедлителя, необходимо было найти точку максимального энерговыделения. Для этого были определены потоки тепловых и резонансных нейтронов следующим образом: были подготовлены и облучены мониторы потока — медь в кадмии и без него. Данные мониторы разместили на поверхности замедлителя на высоте 1, 3, 5, 7, 9 см от верхнего края и облучили при частоте посылок 25 Гц в течение около 14 ч. Второй комплект мониторов облучали при частоте посылок 50 Гц около 5 ч.

Из табл. 1 видно, что наибольший поток тепловых нейтронов наблюдается на высоте 5 см от верхнего края замедлителя. На этой высоте произвели позиционирование каналов N1 и N2 для проведения нейтронного активационного анализа.

ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ КАЧЕСТВЕННОГО И КОЛИЧЕСТВЕННОГО ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА ОБРАЗЦОВ С ПОМОЩЬЮ НЕЙТРОННОГО АКТИВАЦИОННОГО АНАЛИЗА

В результате после пусконаладочных работ была создана ПТС со следующими характеристиками:

- среднее время доставки контейнера с образцом в зону облучения составляет 10 с, возврат контейнера занимает примерно такое же время;
- стравливание воздуха из трубопровода происходит в течение 50 с после прихода контейнера в зону облучения или к стопперу, поэтому минимальное время облучения составляет примерно 1 мин;
- длина трубопровода 40 м;
- максимальная масса контейнера с образцом не менее 13 г. Масса пустого контейнера с крышкой составляет примерно 6 г.

Названные характеристики дают возможность использовать ПТС для проведения НАА по короткоживущим изотопам с периодом полураспада порядка 1 мин. С целью подбора оптимальных параметров облучения типичных образцов с учетом особенностей нейтронных потоков на установке ИРЕН была проведена серия экспериментов. Из одного образца было приготовлено пять комплектов, состоящих из навесок массой 3, 5 и 7 г. Образцы всех комплектов облучали в течение 10, 20, 30, 40 и 50 мин.

Полученные спектры были обработаны в программе GENIE-2000 [2]. Необходимо было выявить такие параметры облучения, при которых возможно определить максимальное количество короткоживущих изотопов. При этом важно было минимизировать количество долгоживущих изотопов для более комфортной обработки полученных спектров. Из табл. 2 видно, что масса практически не влияет на количество получаемых изотопов. Наиболее приемлемые результаты показывают образцы, облученные в течение 30 и 40 мин. Ввиду большего количества определяемых короткоживущих изотопов был сделан выбор в пользу 40-мин облучения. Далее в программу управ-

ления движением контейнера были внесены изменения. Проба стала возвращаться автоматически спустя 40 мин без нажатия кнопки возврата контейнера.

Поскольку объем образцов не позволял считать их точечными источниками, были созданы калибровки по эффективности для высокочистого германиевого детектора Canberra GC-10021 под счетную геометрию контейнера, в котором облучают и измеряют образцы, для высот 2,5, 5, 10 и 20 см. В качестве основы были использованы калибровки по эффективности, построенные по точечным образцовым спектрометрическим гамма-источникам. Необходимо было перейти от этих калибровок к калибровкам для объемных источников. Для этого использовалась программа ANGLE компании АМЕТЕК [3], позволяющая перенести эффективность между разными геометриями. Программа позволяет учитывать параметры детектора, используемого для измерений. Также есть возможность описать геометрию контейнера, в котором находится источник, учесть степень его заполнения и материал образца.

На рис. 7 представлены графики калибровочных кривых. Синим цветом (1) выделена калибровка по эффективности для высоты 10 см от поверхности детектора для точечного источника. Красным цветом (2) — калибровка по эффективности для той же высоты для объемного источника. Использованный при этом источник представляет собой образец типа почва высотой 15 мм, помещенный в описанный выше полиэтиленовый контейнер.

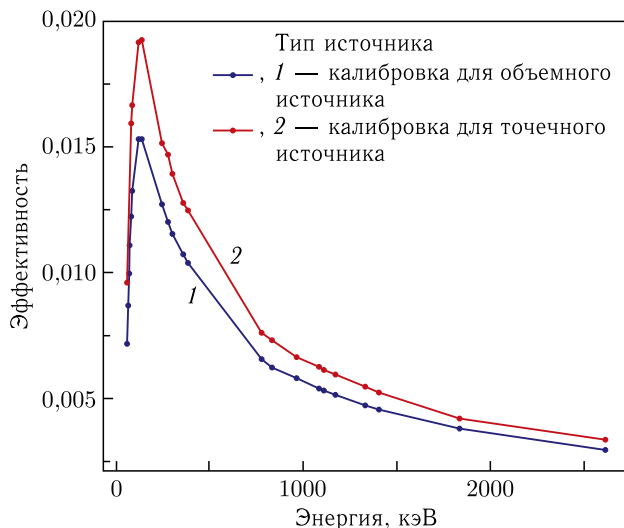


Рис. 7 (цветной в электронной версии). Калибровочные кривые для высоты 10 см

После создания объемных калибровок по эффективности был проведен эксперимент по определению количественного элементного состава образцов. Исследовалась керамика, найденная на территории Казахстана, по короткоживущим изотомам. 17 образцов, 4 стандартных образца и мониторы потока были последовательно облучены в течение 40 мин каждый. Спектры после облучения были обработаны в программе GENIE-2000. В результате было обнаружено 7 элементов. Расчет массовых долей этих элементов был осуществлен в программном обеспечении «Массовые доли» [4, 5]. В табл. 2 внесены данные с результатами расчетов. В заглавных строках таблицы

Таблица 2. Результаты количественного определения элементного состава образцов археологической керамики из Казахстана

Обра- зец	Mg (²⁷ Mg, T _{1/2} = 9,5 мин)		Al (²⁸ Al, T _{1/2} = 2,2 мин)		Si (²⁹ Al, T _{1/2} = 6,6 мин)		Ca (⁴⁰ Ca, T _{1/2} = 8,7 мин)		V (⁵² V, T _{1/2} = 3,7 мин)		Mn (⁵⁶ Mn, T _{1/2} = 2,6 ч)		U (²³⁹ U, T _{1/2} = 23,5 мин)	
	мг/кг	%	мг/кг	%	мг/кг	%	мг/кг	%	мг/кг	%	мг/кг	%	мг/кг	%
e-01	5110	11	157000	5,7	275000	3,9	13600	23	38,5	15	130	7,3	7,44	19
e-02	4310	11	147000	5,7	287000	4	15300	18	35,5	16	79,4	8,2	6,45	19
e-03	2850	11	77200	6	217000	4	15900	20	91,9	13	522	6,6	5,58	19
e-04	3240	11	88800	5,7	246000	4,1	13400	21	105	13	617	6,3	6,99	19
e-05	2890	11	102000	6	237000	4	9200	24	75,4	13	407	6,7	5,32	19
e-06	2680	11	104000	6,1	269000	4	26900	19	86,3	13	417	6,8	5,32	24
e-07	3140	11	158000	6,1	252000	4,2	19200	21	122	14	481	6,7	5,05	20
z-01	3480	11	97100	6	362000	3,9	11500	24	132	15	786	6,5	9,49	27
z-02	2670	11	98900	6,4	331000	4	23500	21	159	11	854	6,7	9,19	26
z-03	2770	11	80700	6,3	265000	4	15100	22	130	12	283	7,3	8,02	26
z-04	3890	11	112000	6	315000	3,9	18200	20	271	11	745	6,1	7,97	27
z-05	3830	11	56400	6	243000	3,9	12500	21	168	12	355	7	11,1	26
z-06	4040	11	159000	6	420000	3,9	16300	27	207	12	961	6,3	11,9	26
z-07	2840	11	89500	6,4	319000	4	11500	23	142	13	566	6,9	8,61	26
z-08	3720	11	124000	6	339000	3,9	13500	28	212	12	883	6,9	12,1	28
z-09	5160	11	327000	6	484000	4	31000	20	213	20	407	8,2	14	28
z-10	4130	12	177000	6	437000	3,9	18000	21	138	16	528	7,5	13,6	27

помимо элементов указаны изотопы, по которым были посчитаны массовые доли этих элементов, а также время их полураспада. По этим данным видно, что ПТС можно успешно использовать для проведения исследований элементного состава по короткоживущим изотопам. Ранее с теми же образцами были проведены исследования элементного состава по долгоживущим изотопам на реакторе ИБР-2, поэтому проделанный эксперимент существенно дополнил картину элементного состава керамических изделий.

ГАММА-АКТИВАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ: ПЕРВЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

С помощью ПТС были сделаны первые шаги по проведению гамма-активационного анализа. Для облучения взяли моноэлементные образцы: медь и алюминиевую фольгу, а также образцы, элементный состав которых известен: стандарт NIST 50С, а также фрагмент штукатурки церкви Спаса на Нередице XII в. из Великого Новгорода. Исследуемый образец помещали в полиэтиленовый контейнер, фиксировали ватным тампоном и доставляли с помощью ПТС к гамма-производящей мишени. Облучение проводили на разных частотах посылок: 2, 5 и 10 Гц с энергией 50 МэВ. Также варьировали количество образца: 0,1, 0,5 и 1 г. Целью эксперимента был качественный элементный анализ.

Первым облучили медный образец (рис. 8). При анализе спектров были обнаружены линии изотопа ^{61}Cu . Этот изотоп получен вследствие реакции $\gamma-2n$ от природного изотопа ^{63}Cu [6].

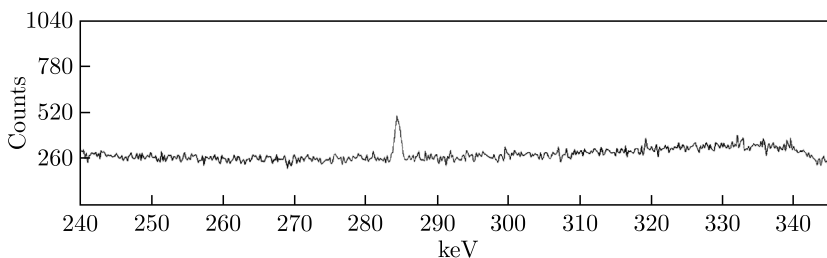
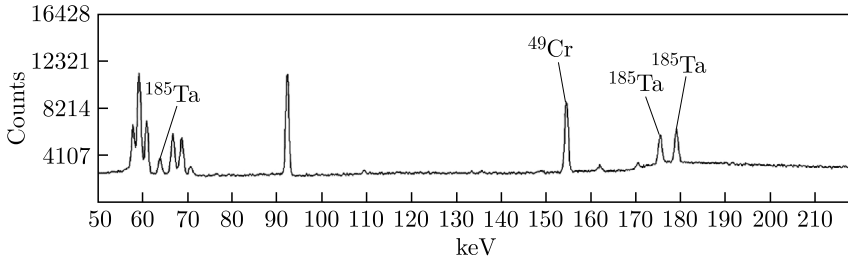
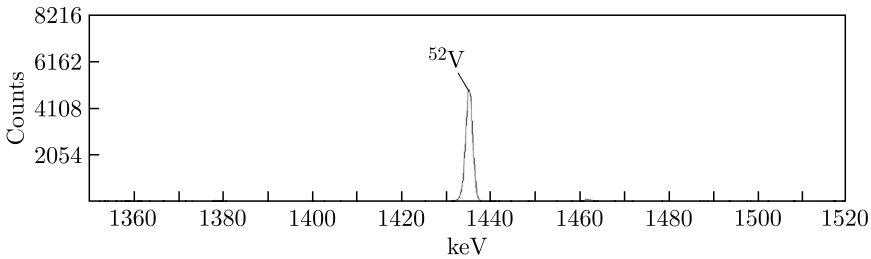
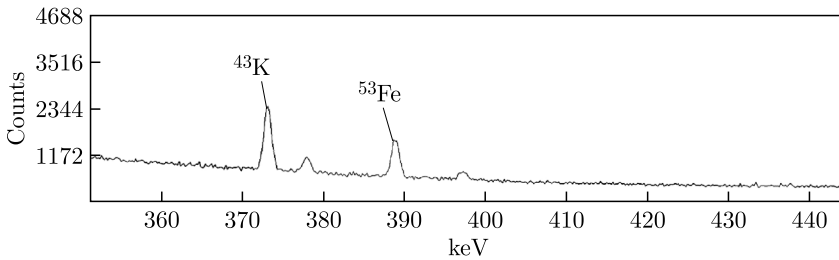


Рис. 8. Изотоп ^{61}Cu по линии 282 кэВ, образец меди

Далее облучили алюминиевую фольгу. На спектре были обнаружены линии двух изотопов: ^{29}Al и ^{28}Al . Данные изотопы не могли возникнуть вследствие гамма-реакций. К сожалению, помимо гамма-излучения с образцом сталкиваются быстрые нейтроны, которые появляются из-за попадания тормозного излучения на вольфрамовую мишень. Данный аспект затрудняет проведение гамма-активационного анализа.

Затем был облучен стандарт 50С, который представляет собой стальную стружку, преимущественно включающую W, Cr, V и C. На спектре были найдены пики изотопов Ta, Cr (рис. 9) и V (рис. 10). Также были обнаружены пики некоторых других изотопов, среди которых только ^{185}Ta , ^{49}Cr и ^{57}Ni можно с уверенностью отнести к результатам гамма-реакций. Остальные, скорее всего, были получены вследствие облучения стандарта быстрыми нейтронами. ^{185}Ta , вероятно, был получен вследствие реакции $\gamma-n, p$ из природного изотопа ^{186}W . ^{49}Cr и ^{57}Ni получены по реакции $\gamma-n$ из природных изотопов ^{50}Cr и ^{58}Ni соответственно.

Рис. 9. Пики изотопов ^{185}Ta и ^{49}Cr , стандарт 50СРис. 10. Пик изотопа ^{52}V , стандарт 50СРис. 11. Пики изотопов ^{43}K и ^{53}Fe , фрагмент штукатурки церкви Спаса на Нередице

Далее облучили фрагмент штукатурки церкви Спаса на Нередице. Элементный состав этого образца был определен ранее с помощью нейтронного активационного анализа. Были обнаружены изотопы ^{43}K , ^{53}Fe (рис. 11), а также изотопы ^{29}Al , ^{47}Ca , ^{126}Cs , ^{137}Nd , ^{47}Sc , ^{89m}Zr , ^{56}Co , ^{64}Co и ^{75}Zn .

Из этой группы только появление изотопов ^{43}K , ^{53}Fe и ^{89m}Zr можно с уверенностью отнести к результатам гамма-реакций. ^{43}K появился по реакции $\gamma - n, p$ из природного изотопа ^{44}Ca . ^{53}Fe и ^{89m}Zr — по реакции $\gamma - n$ из природных изотопов ^{54}Fe и ^{90}Zr соответственно.

В результате эксперимента облучили четыре образца, в трех из которых удалось установить изотопы, образованные с помощью гамма-реакций. Результаты показали, что гамма-активационный анализ на установке ИРЕН возможен, но для его реализации необходимо создать специальное программное обеспечение для автоматизированного расчета массовых долей элементов. Кроме того, необходимо решить проблему, вызванную влиянием тепловых нейтронов, которые также активируют образец.

МОДЕРНИЗАЦИЯ ПНЕВМОТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ РЕГАТА-2

В настоящее время авторы проводят работы по модернизации ПТС. Первоначальный проект не позволял одновременно облучать нейтронами контейнеры с образцами в разных каналах. В настоящее время соответствующим образом дорабатывается программный код для возможности облучения нескольких контейнеров одновременно. Также проводятся работы по замене электромеханического пульта управления на сенсорный и внедрению возможности обмена информацией с базой данных нейтронного активационного анализа [7].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На установке ИРЕН введена в эксплуатацию ПТС РЕГАТА-2. В состав ПТС входят два канала для облучения образцов нейтронами и один — гамма-квантами. ПТС позволяет проводить эксперименты по определению элементного состава образцов по короткоживущим изотопам, период полураспада которых составляет примерно 1 мин и более. С помощью НАА были исследованы экземпляры археологической керамики, найденной на территории Казахстана. Также были осуществлены первые шаги по проведению гамма-активационного анализа. Идет модернизация ПТС.

Группа нейтронного активационного анализа установки ИРЕН планирует продолжить проведение нейтронного активационного анализа, а также дальнейшие эксперименты по внедрению гамма-активационного анализа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Sumbaev A. et al.* LUE-200 Accelerator — a Photo-Neutron Generator for the Pulsed Neutron Source “IREN” // *J. Instrum.* 2020. V. 15, No. 11.
2. Genie-2000. <https://www.mirion.com/products/genie-2000-gamma-analysis-software> (accessed: 18.01.2023).
3. ANGLE Advanced Gamma Spectroscopy Efficiency Calibration. <https://www.ortec-online.com/products/application-software/angle> (accessed: 18.01.2023).
4. *Dmitriev A. Yu., Borzakov S.B.* Software for Calculation of Elements Mass Fractions in Investigated Samples by Absolute Method of Neutron Activation Analysis // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2019. V. 16, No. 6. P. 772–778.
5. *Dmitriev A. Yu., Pavlov S.S.* Automation of the Quantitative Determination of Elemental Content in Samples Using Neutron Activation Analysis on the IBR-2 Reactor at the Frank Laboratory for Neutron Physics, Joint Institute for Nuclear Research // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2013. V. 10, No. 1. P. 33–36.
6. *Segebade C., Weise H.-P., Lutz G.J.* Photon Activation Analysis. Berlin; New York: W. de Gruyter, 1988.
7. *Dmitriev A. Yu., Pavlov S.S.* Software for Automation of Neutron Activation Analysis at the IBR-2 Reactor of FLNP, JINR // *J. Nucl. Meas. Inform. Technol.* 2012. V. 4. P. 54–66.

Получено 6 февраля 2023 г.