

**XXV межвузовская молодежная научная школа-конференция имени Б.С. Ишханова:
Концентрированные потоки энергии в космической технике,
электронике, экологии и медицине.**
**Секция «Радиационные технологии. Синхротронные, нейтронные и ядерно-физические
методы диагностики и модификации материалов»**

**Разработка установки для калибровки ионизационных камер и датчиков обратной
связи выведенного пучка ионов углерода активационными детекторами**

А. Г. Васильева,^{*} М. Ю. Костин,[†] В. А. Пикалов,[‡] А. А. Янович[§]

*Федеральное государственное бюджетное учреждение «Институт физики высоких энергий
имени А.А. Логонова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»
Россия, 142281, Протвино, Московская область, Площадь науки, 1
(Поступила в редакцию 07.04.2025; подписана в печать 14.04.2025)*

В настоящей работе представлена радиометрическая экспериментальная установка, работающая по принципу γ – γ -совпадений, для калибровки ионизационных камер и датчиков обратной связи выведенного пучка ионов углерода активационными детекторами. При этом используются активационный детектор из чистого углерода с естественной смесью изотопов и реакция $^{12}\text{C}(^{12}\text{C},\text{X})^{11}\text{C}$. Установка обеспечивает измерение активности образцов с погрешностью порядка 3%. Приводится блок-схема установки и ее описание, а также описание процесса измерения ее эффективности регистрации с использованием контрольного образцового источника ^{22}Na из набора образцовых спектрометрических гамма источников (ОСГИ). Эффективность регистрации радиометрической установки была измерена и составляет 60.1%. На работающем прототипе данной радиометрической установки в течение нескольких сеансов работы ускорительного комплекса У-70 при работе с ионами углерода энергии 400–450 МэВ/нуклон проводится калибровка плоскопараллельной ионизационной камеры, разработанной и изготовленной ИФВЭ. Готовится руководство по эксплуатации установки и методика выполнения измерений.

PACS: 41.75.Ak, 82.80.Jp, 81.05.U, 87.53.Bn, 29.40.Cs.

УДК: 621.384.668.

Ключевые слова: ускорители, ионы углерода, ионизационные камеры, активационные детекторы.

ВВЕДЕНИЕ

Новейшие клинические исследования в области лучевой терапии показали, что пучки ускоренных ионов углерода являются одним из наиболее совершенных инструментов для лечения онкологических заболеваний [1]. В настоящее время в НИЦ «Курчатовский институт» — ИФВЭ ведутся работы по созданию первого в России экспериментально-клинического комплекса ионной лучевой терапии на действующем ускорительном комплексе У-70. На данном комплексе освоен медленный вывод пучка ускоренных ионов углерода промежуточных энергий в экспериментальный зал. Ведутся работы по разработке методики использования ионов углерода в медицинских целях [2].

Одна из основных задач для ионной лучевой терапии — точное измерение дозы ионизирующего излучения, полученной опухолью и здоровой тканью. Для абсолютной и относительной дозиметрии ионизирующего излучения применяются самые разнообразные детекторы, среди которых наибольшее распространение

получили ионизационные камеры. Особое внимание уделяется разработке методик абсолютной калибровки ионизационных камер для уменьшения неопределенностей в измерении величины поглощенной дозы. Для медицинского применения точность подведения дозы к объему облучаемой опухоли, должна быть не хуже 5%. Актуальность методики калибровки ионизационных камер с использованием активационных детекторов обусловлена ее эффективностью и простотой реализации по сравнению с прямыми измерениями с помощью цилиндра Фарадея [3, 4]. Для работы с пучком ускоренных ядер углерода наиболее применимым является активационный детектор из чистого углерода с естественной смесью изотопов, при этом используется реакция $^{12}\text{C}(^{12}\text{C},\text{X})^{11}\text{C}$.

Активность радиоактивных ядер, образованных в результате ядерных реакций в детекторах, можно измерять как методом интегрального счета на радиометрических установках, так и спектрометрическим методом, например, на полупроводниковом гамма-спектрометре [4]. В первом случае получаемая от измерительной системы информация выдается в виде числа импульсов в пределах от нижнего порога до верхнего за определенное время. Пороговый характер регистрации излучения в подобном методе обуславливает дополнительную погрешность измерения, поэтому необходимо наличие хорошей стабильности порогов реги-

^{*} vasilyeva-ag@ihep.ru

[†] Mikhail.Kostin@ihep.ru

[‡] Vladimir.Pikalov@ihep.ru

[§] Andrei.Yanovich@ihep.ru

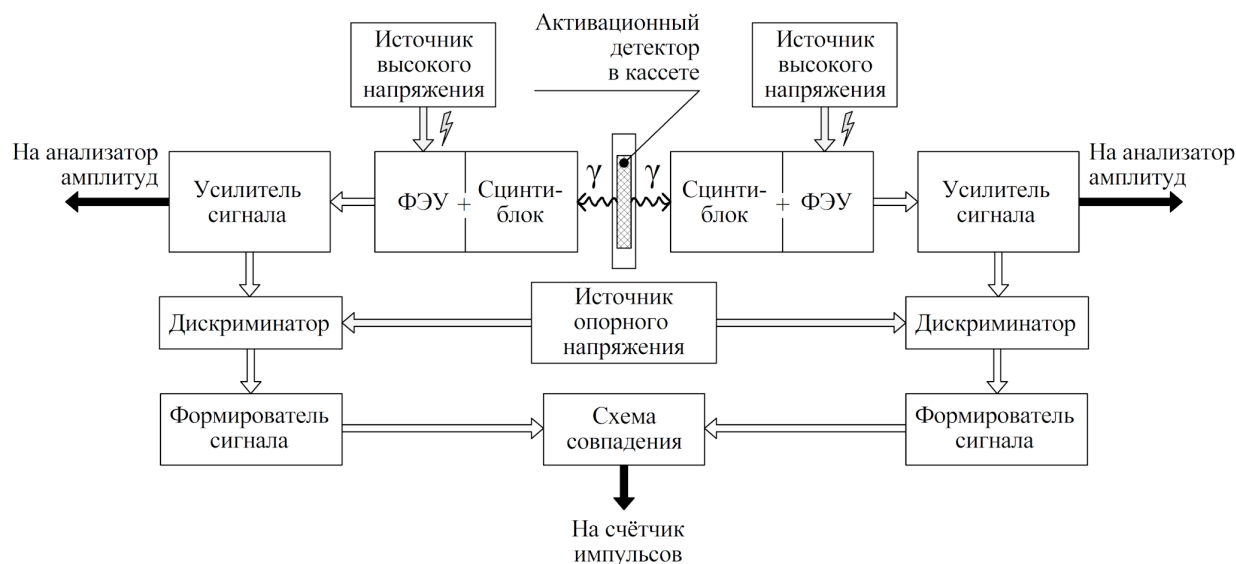


Рис. 1. Блок-схема радиометрической установки

стрируемой аппаратуры. Кроме того, данный метод измерения требует отдельного измерения фона, так как измерение на радиометрической установке постоянно сопровождается неустранимым фоновым излучением, которое смешивается с излучением исследуемого изотопа. Однако если фон мало изменяется со временем между моментом измерения активности и самого фона, или период колебания фона много больше суммарного времени обсчета детектора, погрешность измерения истинной активности будет небольшой.

При использовании спектрометрического метода информация выдается в виде распределения числа импульсов в зависимости от энергии испускаемых гамма-квантов. Так как информация о фоне и полезном эффекте получается одновременно, погрешность, вызываемая нестабильностью фона, в этом случае устраняется. По сравнению с первым методом второй обладает избирательностью, и его удобно использовать, когда в образце находится несколько изотопов, и нужно измерить активность каждого из них.

Особенностью использования активационных детекторов из чистого углерода является образование в них изотопа ^{11}C при облучении пучком ионов углерода. Этот изотоп углерода представляет собой практически 100% β^+ -излучатель и имеет период полураспада 20.34 мин. Испускаемые при распаде позитроны аннигилируют с электронами вещества самого детектора или окружающего материала. При аннигиляции позитрона и электрона испускаются два γ -кванта с энергией 511 кэВ строго в противоположном друг от друга направлении. Конечно, при высоких энергиях взаимодействия с пучком ионов углерода в мишени происходят несколько ядерных реакций с образованием радиоактивных ядер, однако они имеют очень короткие периоды полураспада (например, 19.3 с для ^{10}C и не больше 10 мкс для остальных). Поэтому при измере-

нии активности мишени спустя 5–10 мин после окончания облучения можно считать, что кроме изотопа ^{11}C в мишени нет других радиоактивных ядер.

Поскольку на момент измерения истинной активности в образце присутствует только один изотоп, для измерения активности после облучения детекторов из чистого углерода удобно использовать радиометрическую установку, работающую по принципу γ - γ -совпадений. Такие установки имеют минимальный собственный фон и позволяют работать без большой и дорогостоящей защиты.

В настоящей работе представлена радиометрическая экспериментальная установка, работающая по принципу γ - γ -совпадений для калибровки ионизационных камер и датчиков обратной связи выведенного пучка ионов углерода активационными детекторами. Погрешность градуировки установки составляет около 3%.

1. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Блок-схема установки приведена на рис. 1.

В качестве блоков детектирования в установке используются монокристаллические сцинтилляторы на основе NaI(Tl) диаметром 200 мм и высотой 100 мм, которые оптически соединены каждый со своим фотопомножителем (ФЭУ) с помощью кремнийорганического клея. Данные сцинтилляторы имеют высокую эффективность регистрации, но вместе с тем являются достаточно медленными (время высвечивания 300 нс). Невысокое время высвечивания сцинтиллятора ставит ограничение на максимальную активность образцов — не более 105 распадов в секунду, однако это является оптимальной величиной для текущих задач. Зазор между сцинтилляторами составляет 30 мм, что для помещенного между ними активационного детектора,

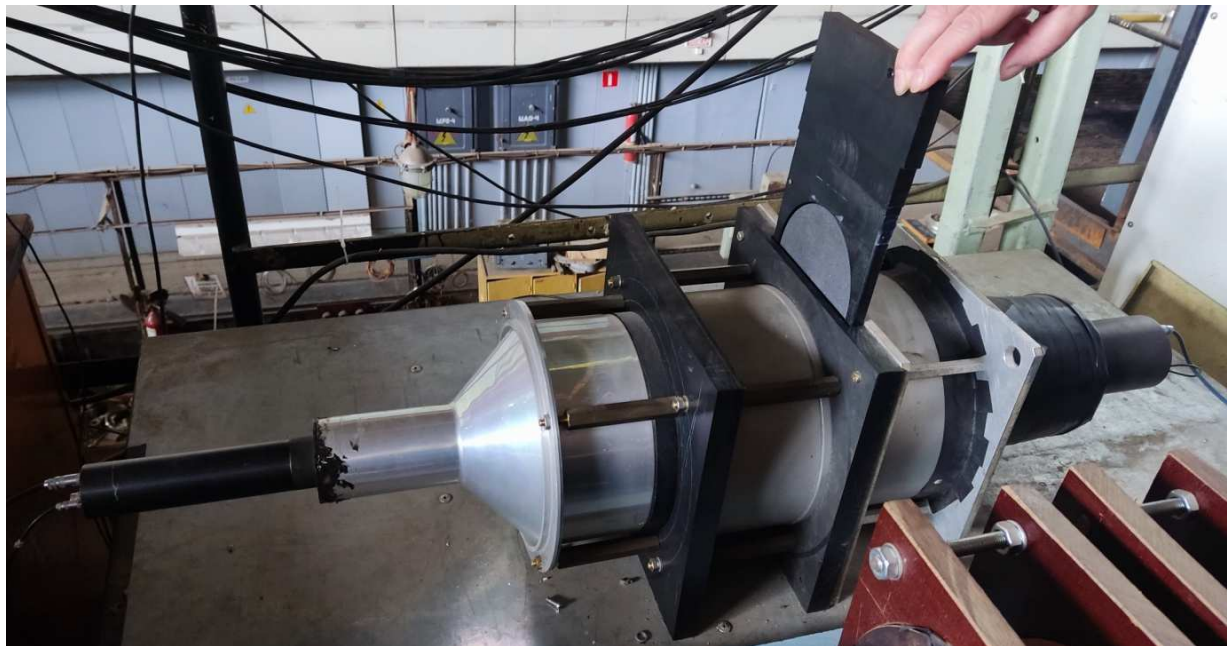


Рис. 2. Блоки детектирования радиометрической установки: ФЭУ-49 с сцинтилляционными детекторами NaI. Кассета с активационным детектором вынута, виден активационный детектор из графита. Амплитудный анализатор и счетчик импульсов на фото не показан

представляющего собой диск из графита высокой чистоты (99.99%) диаметром 120 мм и толщиной 5.37 мм, составляет практически 4π геометрию при регистрации аннигиляционных γ -квантов в режиме совпадений в детекторах. Для размещения активационных детекторов между двумя сцинтилляторами изготовлена специальная кассета со сменными вкладышами для различных размеров источников, которая должна обеспечивать строго воспроизводимую геометрию измерений.

Сцинтилляторы просматриваются фотоэлектронными умножителями ФЭУ-49 (рабочий диаметр фотокатода 170 мм). Каждый ФЭУ питается от своего компактного автономного источника стабильного высоковольтного напряжения. Напряжение питания для каждого ФЭУ устанавливается отдельно и его возможно контролировать в режиме реального времени. Сигналы с ФЭУ поступают на вход усилителей. Усилители сигнала имеют одинаковые фиксированные коэффициенты усиления и два выхода. Сигнал с одного из выходов поступает на амплитудный анализатор, а со второго выхода на схему амплитудного дискриминатора. В качестве дискриминатора используются высокоскоростные маломощные компараторы с дифференциальными входами и TTL выходами. Амплитудные дискриминаторы формируют прямоугольные импульсы при превышении амплитуды сигнала на входе выше порога. Величина порога формирования устанавливается высокоточным и высокостабильным потенциометром относительно опорного напряжения. Прецизионный регулируемый источник опорного напряжения один для обоих дискриминаторов, напряжение поддерживается с точностью $\pm 0.3\%$. Сформированные прямоугольные

импульсы с дискриминаторов поступают на схему совпадения. При совпадении двух импульсов формируется импульс, амплитуды TTL, который поступает на счетчик импульсов. Фото радиометрической установки приведено на рис. 2.

С помощью счетчика импульсов измеряется скорость счета совпадений за выбранные промежутки времени (порядка нескольких секунд). Затем восстанавливается кривая радиоактивного распада и, с учетом знания периода полураспада и времени конца облучения, вычисляется активность наработанного изотопа ^{14}C за время облучения. Зная активность детектора на момент конца облучения, можно рассчитать число частиц (ядер углерода) I , прошедших через мишень, что и требуется для калибровки ионизационных камер и датчиков обратной связи. В случае, когда время облучения активационного детектора много меньше периода полураспада образующегося изотопа, для этого можно использовать формулу 1:

$$I = \frac{C_0 \tau}{N_n d \sigma \varepsilon}, \quad (1)$$

где C_0 — активность изотопа мишени на момент конца облучения, Бк/с;

τ — постоянная распада, с, рассчитываемая по формуле 2;

N_n — число ядер в единице объема мишени, см^{-3} , рассчитываемое по формуле (3);

d — толщина мишени, см;

σ — сечение ядерной реакции, см^2 ;

ε — эффективность регистрации радиометрической установки.

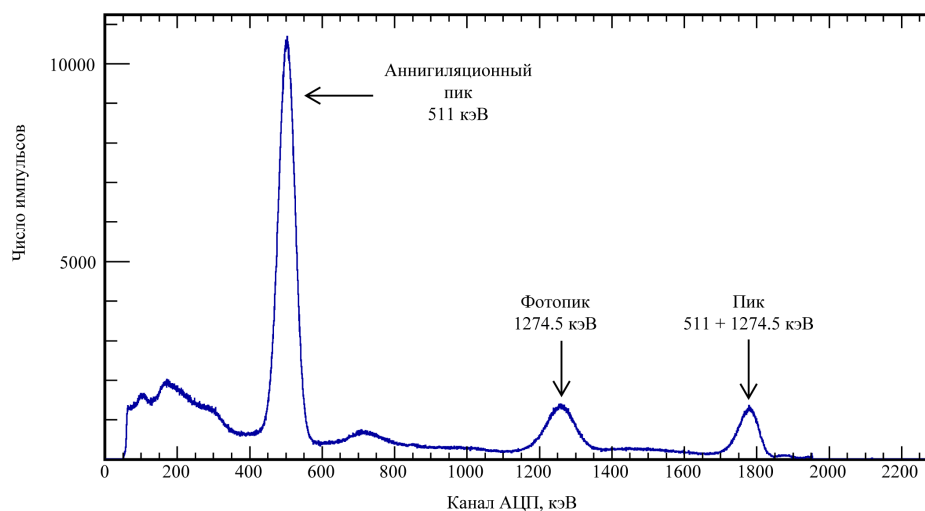


Рис. 3. Амплитудный спектр ^{22}Na с калибровкой по энергии

$$\tau = \frac{T_{1/2}}{\ln 2}, \quad (2)$$

где $T_{1/2}$ — период полураспада изотопа мишени, с.

$$N_n = \frac{\rho}{A} \cdot N_A, \quad (3)$$

где ρ, A соответственно, плотность, г/см³ и атомная масса материала мишени, а.е.м., N_A — число Авогадро, моль⁻¹.

2. ИЗМЕРЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕГИСТРАЦИИ УСТАНОВКИ ДЛЯ КОНТРОЛЬНОГО ИСТОЧНИКА ^{22}Na

Для достоверного расчета числа частиц, прошедших через мишень, необходимо знать эффективность регистрации ε разработанной радиометрической установки (см. формулу 1). Работа по измерению эффективности ε выполняется следующим образом. Как известно [5], для блоков детектирования с ФЭУ характерна такая величина как время установления. Это время с момента подачи напряжения, по истечении которого изменение анодного тока не превышает заданной величины. Как правило наибольшие изменения анодного тока происходят в течение 30 мин после включения. Поэтому перед измерениями радиометрическая установка включается на прогрев, а затем измеряется собственный фон установки.

В кассету с соответствующим вкладышем устанавливается контрольный источник из набора образцовых опектметрических гамма-источников (ОСГИ) ^{22}Na

(№ 7182, паспорт № 13128) диаметром 44 мм. Предварительно с каждого из каналов установки снимается амплитудный спектр с целью выравнивания пиков полного поглощения γ -квантов энергии 511 кэВ по каналам АЦП путем коррекции высоковольтного питания ФЭУ. На рис. 3 приведен амплитудный спектр с калибровкой по энергии, снятый с одного из каналов установки. Далее запускается непосредственно процесс измерения скорости счета импульсов после схемы совпадения (см. рис. 1). Импульсы подаются на вход счетчика импульсов, длительность интервала — 20 с, набор — 60 временных интервалов (20 мин). В качестве амплитудного анализатора и счетчика импульсов используется амплитудный анализатор АЦП-USB-8K-П производства АСПЕКТ (Дубна).

Затем полученные данные обрабатываются в ROOT [6] путем сравнения скорости счета за вычетом фона с активностью контрольного источника ОСГИ ^{22}Na на момент измерения.

Измеренная эффективность регистрации радиометрической установки на данный момент оценивается в 60.1%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана экспериментальная установка, работающая по принципу γ - γ -совпадений для калибровки ионизационных камер и датчиков обратной связи выведенного пучка ионов углерода активационными детекторами. На работающем прототипе данной радиометрической установки в течение нескольких сеансов работы ускорительного комплекса У-70 проводится регулярная калибровка плоскопараллельной ионизационной камеры, разработанной и изготовленной ИФВЭ, на энергии 400 МэВ/нуклон.

Готовится руководство по эксплуатации установки и ведется разработка оригинальной методики абсолютной калибровки ионизационных камер и датчиков обратной связи активационными детекторами. Создание подобной методики и установки в перспективе позво-

лит уменьшить неопределенность в измерении величины поглощенной объемом облучаемой опухоли дозы до не более 5%, что необходимо для медицинского применения.

-
- [1] *Durante M., Orecchia R., Loeer J.S.* // Nat. Rev. Clin. Oncol. **14**. 483 (2017).
[2] *Pikalov V.A., Antipov Y.M., Maximov A.V. et al.* // Proc. 27th Russian Particle Acc. Conf. 124. (2021).
[3] *Cumming J.B.* // Annu. Rev. Nucl. Sci. **13**. 261 (1963).
[4] *Крупный Г.И., Стеценко Г.Н., Янович А.А.* Методиче-

- ские вопросы использования пороговых активационных детекторов в радиационных исследованиях на ускорительном комплексе ИФВЭ: Препринт ИФВЭ 2000-30. Протвино. 2000.
[5] *Шендрик Р.Ю., Раджабов Е.А.* Введение в физику сцинтилляторов 2. Учеб. пособие. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2014.
[6] <https://root.cern.ch>

Development of a setup for calibration of ionization chambers and feedback sensors of the extracted carbon ion beam with activation detectors

A. G. Vasilyeva^a, M. Yu. Kostin^b, V. A. Pikalov^c, A. A. Yanovich^d

*Logunov Institute of High-Energy Physics, National Research Centre «Kurchatov Institute»
Protvino 142281, Russia*

E-mail: ^aavasilyeva-ag@ihep.ru, ^bMikhail.Kostin@ihep.ru, ^cVladimir.Pikalov@ihep.ru, ^dAndrei.Yanovich@ihep.ru

This paper presents a radiometric experimental setup operating on the γ - γ -coincidence principle for calibration of ionization chambers and feedback sensors of the extracted carbon ion beam with activation detectors. In this case, an activation detector made of pure carbon with a natural isotope mixture and the $^{12}\text{C}(^{12}\text{C},\text{X})^{11}\text{C}$ reaction are used. The setup ensures the measurement of sample activity with an error of about 3%. A block diagram of the setup and its description are provided, as well as a description of the process of measuring its registration efficiency using a control reference source ^{22}Na . The registration efficiency of the radiometric setup was measured and is estimated at 60.1%. The working prototype of this radiometric setup has already been used for several sessions of operation of the U-70 accelerator complex when working with carbon ions with an energy of 400-450 MeV/nucleon to calibrate the plane-parallel ionization chamber developed and manufactured by IHEP. A manual for the operation of the setup and a technique for performing measurements are being prepared.

PACS: 41.75.Ak, 82.80.Jp, 81.05.U, 87.53.Bn, 29.40.Cs

Keywords: accelerators, carbon ions, ionization chambers, activation detectors.

Received 07 April 2025.

Сведения об авторах

- Васильева Алина Геннадиевна — инженер-исследователь, аспирант; e-mail: vasilyeva-ag@ihep.ru.
- Костин Михаил Юрьевич — вед. инженер; тел.: +7 (4967) 1-33-05, e-mail: Mikhail.Kostin@ihep.ru.
- Пикалов Владимир Александрович — нач. лаборатории; e-mail: Vladimir.Pikalov@ihep.ru.
- Янович Андрей Антонович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; e-mail: Andrei.Yanovich@ihep.ru