

МОНИТОРИРОВАНИЕ ВЫВЕДЕННЫХ ПУЧКОВ УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА НУКЛОТРОН ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ «ЭНЕРГИЯ + ТРАНСМУТАЦИЯ»

*А. А. Балдин^{а,б}, А. И. Берлев^{а,б}, С. Е. Васильев^а, А. В. Вишневецкий^а,
Н. М. Владимирова^а, И. В. Кудашкин^{а,б,1}, А. М. Маканькин^а,
М. Параипан^{а,б}, С. И. Тютюнников^а*

^а Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

^б Институт перспективных исследований «Омега», Дубна, Россия

^с Институт космических исследований, Бухарест-Магуреле

Представлены результаты работы созданной системы мониторинга для измерения абсолютной интенсивности и контроля пространственно-временной структуры выведенных пучков ускорителя нуклотрон на основе ионизационного и активационного методов. Созданная и апробированная система мониторинга позволяет измерять абсолютную интенсивность выведенных пучков с точностью 10% и контролировать пространственное положение центра тяжести пучка с точностью 0,5 мм.

A monitoring system for measuring absolute intensity and space-time structure of extracted beams of Nuclotron based on the ionization and activation methods was created and tested. The monitoring system can measure absolute intensity of extracted beams with an accuracy of about 10% and beam position with an accuracy of about 0.5 mm.

PACS: 29.27.Fh; 29.20.dk

ВВЕДЕНИЕ

На выведенных пучках ускорительного комплекса нуклотрон в зоне фокуса Ф-3 традиционно проводятся эксперименты по облучению тяжелых мишеней («Гамма-3», «Квинта») в рамках темы «Энергия + трансмутация», а также биологических объектов. Особенность проведения таких исследований требует контроля как интенсивности, так и пространственно-временных характеристик выведенных пучков в процессе облучения с паспортизацией накопленных данных для последующего анализа экспериментов. На начальном этапе проведения облучений в основном использовался активационный метод для определения интегрального потока частиц пучка, выведенного на исследуемую мишень. К недостаткам данного метода относятся прежде всего необходимость иметь информацию о временной структуре облучения от цикла к циклу ускорителя, а также невозможность контроля положения и формы пучка в процессе облучения мишеней.

¹E-mail: kudashkin@jinr.ru

Эксперименты с установкой «Квинта» показали необходимость развития системы диагностики и мониторинга выведенных пучков с использованием альтернативных систем. В данной статье описываются системы диагностики на основе ионизационных камер, РАD-детекторов, проволочных пропорциональных камер, созданные и успешно использованные в экспериментах 2012–2015 гг.

ОПИСАНИЕ СИСТЕМ МОНИТОРИРОВАНИЯ

Целью настоящей работы было создание системы мониторинга выведенных пучков нуклотрона в диапазоне интенсивностей от 10^5 – 10^{11} частиц за цикл вывода с определением абсолютной величины интенсивности с точностью 10 % и контроля пространственно-временного распределения пучка на облучаемой мишени с точностью 1 мм для центра тяжести пучка в плоскости, перпендикулярной направлению выведенного пучка.

На рис. 1 приведена схема системы мониторинга, включающей следующий набор детекторов: восьмизазорная ионизационная камера IC1; координатно-чувствительная ионизационная камера IC2; многопроволочная пропорциональная камера МРС; РАD-камера; набор калибровочных сцинтилляционных счетчиков. Сцинтилляционные счетчики используются для измерений низких интенсивностей (менее 10^7 частиц/с), а также для абсолютной калибровки ионизационных детекторов при пониженной интенсивности.

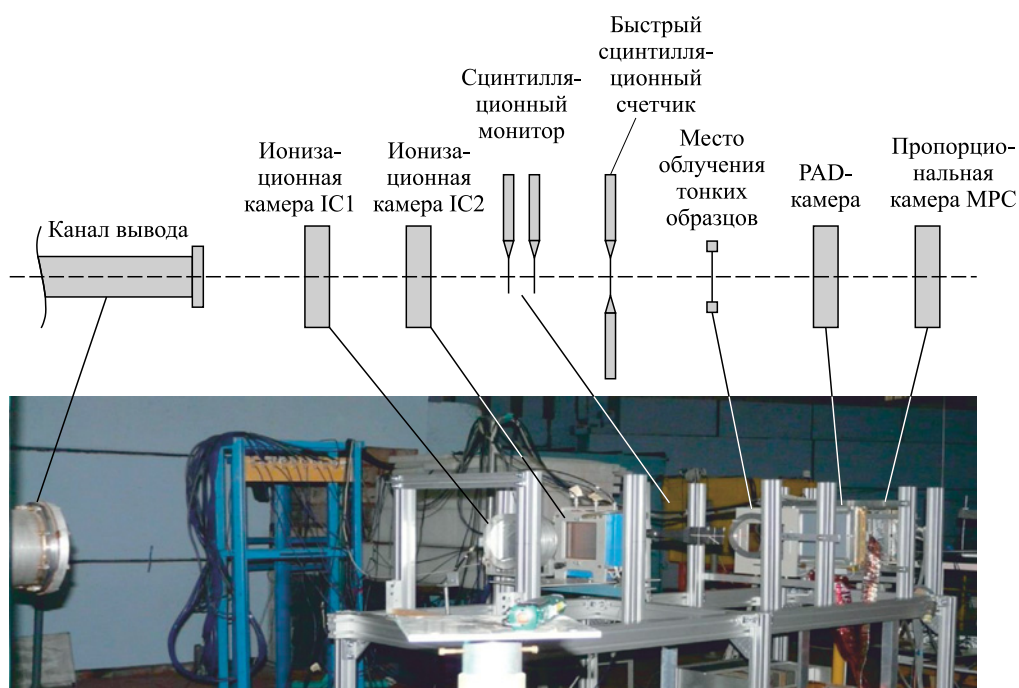


Рис. 1. Система мониторинга выведенных пучков нуклотрона в экспериментальном зале фокуса Ф-3

Ионизационная камера IC1 состоит из восьми секций диаметром 200 мм и толщиной по 10 мм каждая по пучку. Секции разделены майларовой пленкой толщиной 10 мкм с двухсторонним алюминиевым напылением. В качестве активного вещества использовался воздух при атмосферном давлении (возможно использование аргона и других газов). Рабочее напряжение камеры равно +800 В. Камера работает в режиме сбора ионов, где заряд со всех восьми секций объединяется в общий зарядовый сигнал.

Ионизационная камера IC2 (проволочного типа) состоит из двух независимых рабочих газовых объемов толщиной по 8 мм по пучку. Сигнальные и потенциальные плоскости камеры выполнены из проволок золоченого вольфрама толщиной 30 мкм, натянутых во взаимно перпендикулярных направлениях с шагом 2 мм. Рабочий газ — аргон. Камера работает в режиме сбора ионов при напряжении на потенциальных плоскостях, равном +800 В. Особенность данной камеры заключается в том, что предусмотрена возможность съема заряда с группы проволок в каждой плоскости, что позволяет измерять пространственное положение пучка. В описываемой системе мониторинга сигнальные проволоки камеры объединялись по две группы в каждой плоскости (право-лево, верх-низ), что позволяет контролировать изменение положения центра тяжести выведенного пучка. Таким образом, с данной камеры одновременно регистрируются четыре зарядовых сигнала.

Сигналы с камер IC1 и IC2 регистрируются при помощи специализированного восьми-канального преобразователя заряд-частота [1], который вырабатывает импульс стандарта NIM длительностью 500 нс на каждые 25 пКл зарегистрированного заряда. Для регистрации цифровых импульсов с привязкой по времени используется многоканальный счетчик с буферной памятью. Такая методика позволяет зарегистрировать не только общий заряд по каждому каналу, но и временную структуру выведенного пучка. Точность измерения временной структуры определяется скоростью измерения и оцифровки преобразователя заряд-частота, которая составляет 500 нс на один отсчет. Рабочее напряжение ионизационных камер было выбрано на основе измеренной зависимости числа отсчетов от напряжения на камере в середине «плато» (в диапазоне изменения напряжения от +400 до +1400 В число отсчетов растет не более чем на 5%). Проволочные пропорциональные камеры и PAD-камера, использованные в системе мониторинга, подробно описаны в работе [2].

В стандартной активационной методике, применяемой в экспериментах «Энергия + трансмутация» [3], используются алюминиевые фольги с последующим анализом величины наведенной активности в них при помощи полупроводниковых детекторов (ППД). Метод основан на известной реакции преобразования алюминия в изотоп натрия $^{27}\text{Al}(d, x) \rightarrow ^{24}\text{Na}$. Подробно методика и анализ факторов, влияющих на точность измерения, изложены в работах [4, 5]. Погрешность данного метода в основном определяется точностью знания величины сечения реакции для данного пучка с алюминием. Однако в процессе измерений наблюдалось, что в разных группах коллаборации «Энергия + трансмутация», использующих активационную методику, полученные результаты для одного и того же облучения (принимались одни и те же величины сечений реакции, известная эффективность конкретного спектрометра и единая методика анализа данных) отличаются на величину до 40 %, что в несколько раз выше предполагаемых погрешностей самой методики. Отклонения такого же масштаба наблюдались и в сравнении с показаниями интенсивности на основе штатных детекторов, расположенных непосредственно на выводе пучка из ускорителя. Это стимулировало развитие систем

мониторирования выведенных пучков в зоне облучения мишеней и проведение абсолютных измерений интенсивностей пучков альтернативными методами. Кроме того, расчеты и моделирования процессов в тяжелых мишенях показали необходимость измерения и контроля пространственных характеристик пучка при облучении.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

На первом этапе работы проведены одновременные измерения интенсивности пучка всеми ионизационными детекторами при разных режимах работы ускорителя по интенсивности и временной структуре пучка. Данные измерения показали, что ошибки относительных измерений всеми ионизационными детекторами находятся в пределах 5%. На рис. 2 приведены распределения нормированных на единицу отношений показаний интенсивности ионизационных камер: отношение показаний камеры IC1 к показаниям PAD-камеры и соотношение между показаниями камер IC1 и IC2.

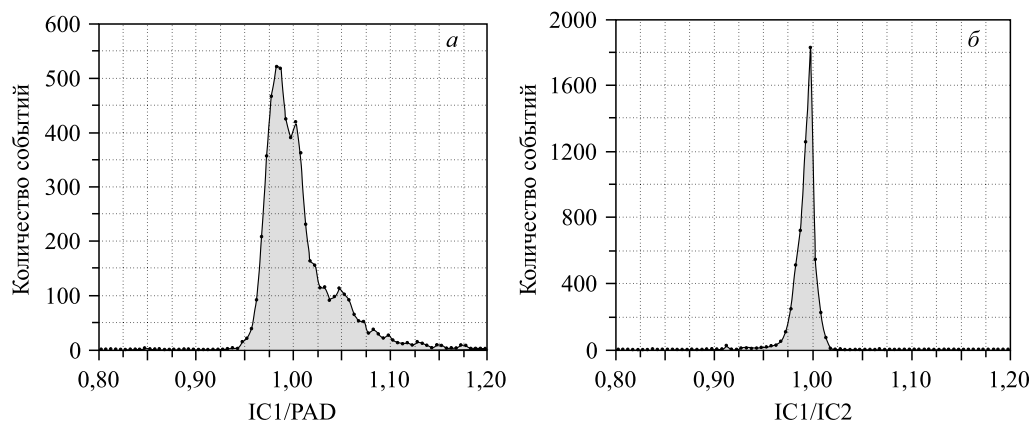


Рис. 2. Гистограммы нормированных на единицу отношений показаний интенсивности ионизационных камер: а) отношение IC1 к PAD-камере; б) отношение IC1 к IC2. Пучок дейтронов с энергией 4 ГэВ/нуклон

На рис. 3 представлена временная структура одного цикла вывода пучка из ускорителя (ядра углерода с энергией 2 ГэВ/нуклон), полученная с ионизационной камеры IC1. Длительность вывода — 750 мс, при этом счет с камеры IC1 составлял около 40 событий за один временной шаг, равный 3,5 мс. Интенсивность пучка в данном цикле вывода — $5,8 \cdot 10^7$ ядер углерода. При уменьшении временного шага измерения до 1 мс и меньше начинают проявляться паразитные частоты во временной структуре выведенного пучка.

Для определения пространственного распределения пучка (ширины и координаты центра тяжести) на мишени использовалась многопроволочная пропорциональная камера МРС. Для альтернативного метода контроля положения пучка и его отклонения в процессе облучения были проанализированы данные с секционированной ионизационной камеры IC2. Сравнительный анализ данных о положении пучка с камер МРС и IC2 показал возможность использования камеры IC2 для динамического контроля координаты центра тяжести пучка. Координата центра тяжести пучка X в горизонтальном

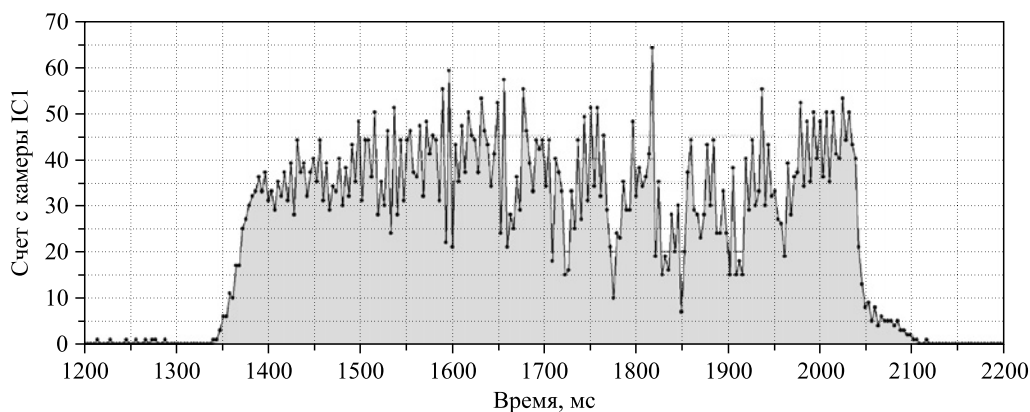


Рис. 3. Временная структура выведенного пучка ядер углерода с энергией 2 ГэВ/нуклон по камере IC1, соответствующая одному циклу вывода из ускорителя (длительность вывода составляет 750 мс, временной шаг оцифровки данных с камеры — 3,5 мс)

направлении по камере IC2 аппроксимировалась квадратичной функцией от величины отношения числа отсчетов правой к числу отсчетов левой половины камеры (аналогично вычислялись верхняя и нижняя половины для вертикальной координаты). Квадратичная функция вида $X = a + br + cr^2$ (r — отношение числа отсчетов правой к числу отсчетов левой половины камеры; a , b , c — константы) была определена на основе предположения о гауссовой форме распределения пучка с параметром $\sigma = 5$ мм, что соответствует характерным размерам выведенного пучка из нуклотрона. Очевидно, что точность определения координаты центра тяжести пучка при помощи данной методики нелинейно зависит от ширины пучка, смещения центра тяжести пучка относительно центра камеры, а также от статистической обеспеченности самих измерений. На рис. 4 показана зависимость координаты центра тяжести пучка дейтронов с энергией 4 ГэВ/нуклон от номера цикла, измеренная при помощи камеры MPC и камеры IC2. Видно, что смещение пучка в течение всего времени облучения составило около 0,5 мм по горизонтали и 1,5 мм по вертикали, что синхронно регистрируют обе камеры. Отметим, что в данных измерениях центры камер смещены относительно друг друга на величину 0,8 мм по горизонтали и 5 мм по вертикали (рис. 5).

На рис. 5 показана разница в определении центра тяжести пучка по камерам MPC и IC2. Видно, что методика использования секционированной камеры IC2 позволяет контролировать положение центра тяжести пучка с точностью не хуже $\sigma = 0,5$ мм для отклонений пучка относительно центра камеры в пределах его ширины на полувысоте (FWHM). Однако следует учесть, что точность измерения координаты центра тяжести пучка зависит от точности позиционирования камеры относительно оси выведенного пучка. В приведенных выше измерениях центр камеры по горизонтальной координате был выставлен по центру тяжести пучка с точностью 1 мм, а по вертикальной координате был смещен на 4 мм относительно центра тяжести пучка. Как видно из рис. 5, точность определения положения центра тяжести пучка по вертикальной координате в два раза хуже по сравнению с точностью по горизонтальной координате.

Таким образом, методика использования секционированной ионизационной камеры IC2 позволяет в процессе облучения проводить одновременное измерение

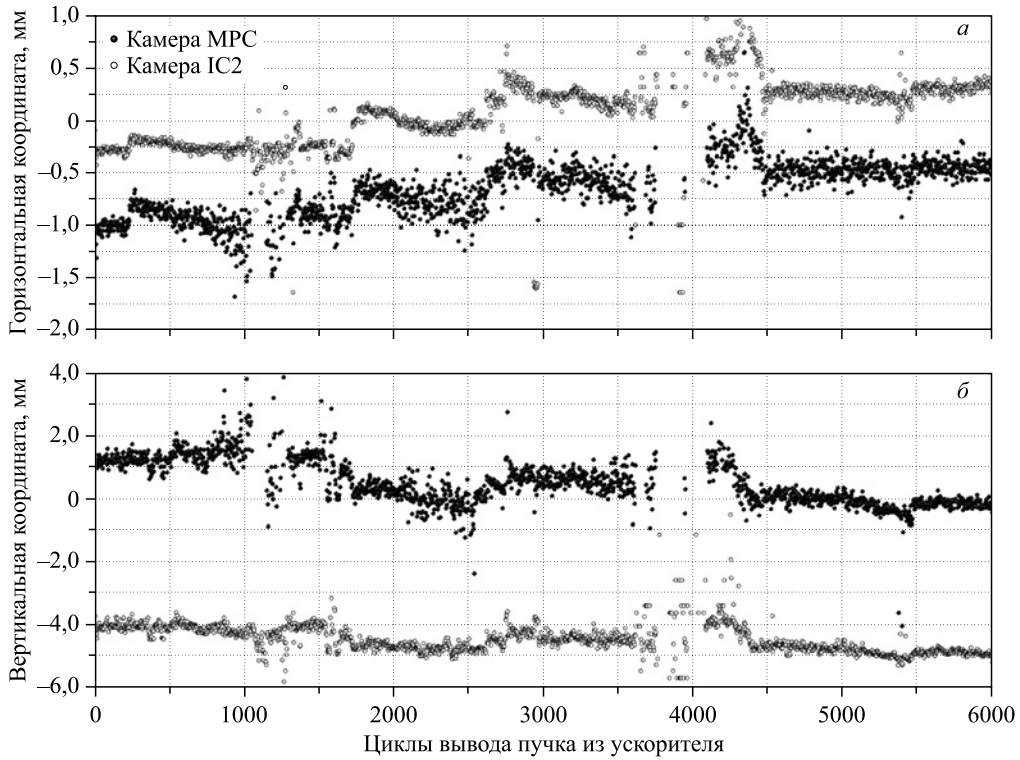


Рис. 4. Координата центра тяжести пучка, измеренная при помощи камеры MPC и камеры IC2, в течение облучения мишени пучком дейтронов с энергией 4 ГэВ/нуклон: а) горизонтальная координата пучка; б) вертикальная координата пучка

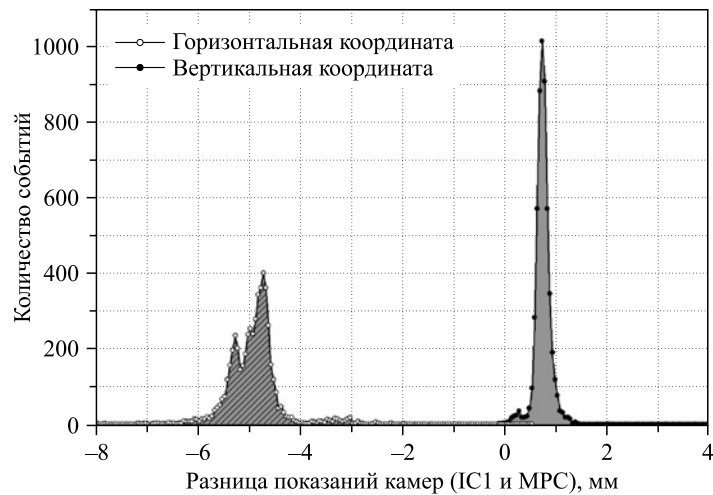


Рис. 5. Гистограмма разницы в определении координаты центра тяжести пучка между камерами MPC и IC2 в течение облучения мишени пучком дейтронов с энергией 4 ГэВ/нуклон

интенсивности и положения центра тяжести пучка с помощью минимального числа каналов регистрации.

Абсолютная калибровка ионизационных камер была проведена на пучках с пониженной интенсивностью 10^4 – 10^6 частиц/с в режиме счета каждой частицы быстрыми сцинтилляционными счетчиками. Калибровка ионизационных камер проводилась с использованием нескольких (до четырех) быстрых сцинтилляционных счетчиков, включенных в совпадение. Счетчики регистрировали каждый ион, проходящий через сцинтиллятор (число отсчетов с каждого счетчика совпадало с числом совпадений с точностью 0,1%). Размер сцинтиллятора (70×70 мм) заведомо превышал поперечные размеры регистрируемого пучка.

Необходимо отметить, что данный режим калибровки возможен только в том случае, когда диапазон работы сцинтилляционных счетчиков по интенсивности (в режиме регистрации каждой частицы) перекрывается с диапазоном работы ионизационной камеры для получения достаточного количества отсчетов. Каждый отсчет камеры соответствует сбору заряда 25 пКл. При этом точность определения интенсивности по ионизационной камере составляет один отсчет. Таким образом, для получения 10 %-й точности необходимо зарегистрировать не менее 10 отсчетов для одного измерения, что соответствует порядку 10^7 дейтронов или 10^5 ядер углерода, прошедших через камеру. Характерная длительность вывода пучка на нуклотроне составляет 300–1000 мс. Максимальная нагрузка сцинтилляционного счетчика — до 10^7 частиц/с. Тем не менее с учетом временной неравномерности вывода пучка максимальная нагрузка сцинтилляционного счетчика ограничена величиной порядка 10^6 частиц/цикл и зависит от равномерности и длительности вывода пучка из ускорителя. При интенсивностях выше указанной величины сцинтилляционные счетчики начинают просчитывать. Таким образом, калибровка ионизационных камер оказалась возможна только при пучках ядер углерода, доступных на тот момент на нуклотроне.

На рис. 6 представлена теоретическая оценка коэффициента линейного преобразования камеры ИС1 и полученные экспериментальные данные в зависимости от энергии пучка ядер углерода.

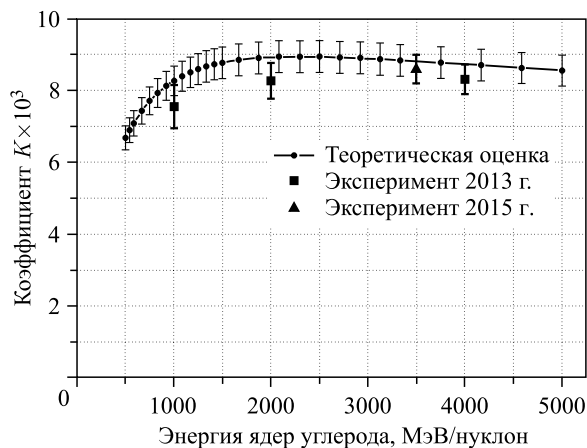


Рис. 6. График теоретической оценки коэффициента линейного преобразования K и экспериментальные данные калибровки ионизационной камеры ИС1

Число пар электрон–ион n определяется по формуле

$$n = \frac{dE}{dx} \frac{d}{\text{Ion}}, \tag{1}$$

где dE/dx — ионизационные потери частицы пучка в газовом объеме камеры; d — толщина ионизационной камеры (активный зазор); Ion — энергия, затрачиваемая на образование одной электрон-ионной пары.

С учетом того, что один импульс с ионизационной камеры вырабатывается при образовании заряда 25 пКл, коэффициент линейного преобразования камеры K определяется по формуле

$$K = \frac{25 [\text{пКл}] \cdot \text{Ion} [\text{эВ}]}{d [\text{мм}] \cdot e [\text{пКл}] \cdot dE/dx [\text{эВ/мм}]}. \tag{2}$$

Известно, что величина Ion слабо зависит от типа налетающей частицы [6]. На образование одной пары электрон–ион в газообразном аргоне требуется в среднем 26 эВ, а в воздухе — 35 эВ. Расчеты ионизационных потерь dE/dx для пучков дейтронов и ядер углерода сделаны на основе программы SRIM [7]. Основной вклад в ошибку теоретической оценки, указанной на рис. 6, приносят погрешности в определении величины Ion (5%) и расчет ионизационных потерь (4%). Отметим, что теоретические оценки согласуются в пределах 10% с экспериментально полученными результатами калибровки ионизационных камер.

На рис. 7 показаны зависимости счета совпадения сцинтилляционных счетчиков от числа отсчетов камеры IC1 при разных энергиях пучка углерода. Отклонение от линейной зависимости происходит из-за перегрузки сцинтилляционных счетчиков и, очевидно, зависит от временной структуры выведенного пучка. При энергии 1 ГэВ/нуклон временная структура выведенного пучка была менее однородна по сравнению с пучком с энергией 4 ГэВ/нуклон, поэтому отклонение от линейной зависимости наступает при меньшей интенсивности пучка.

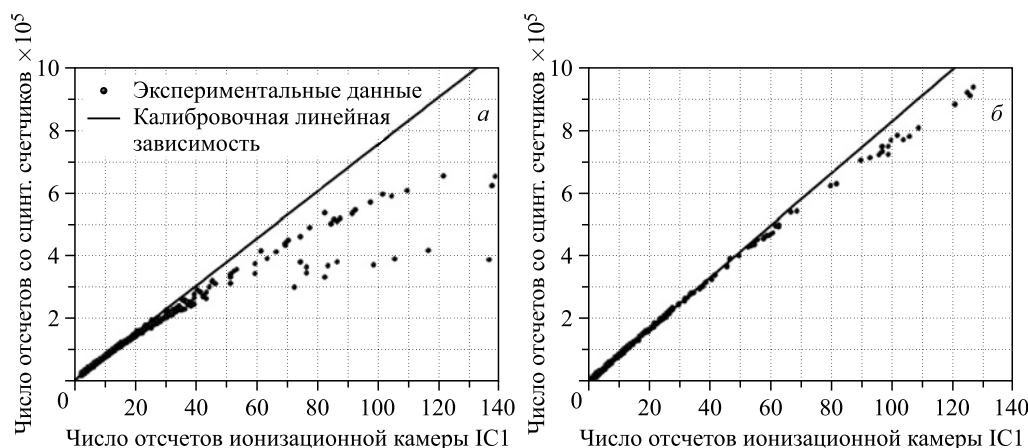


Рис. 7. График зависимости счета совпадения сцинтилляционных счетчиков (ось ординат) от числа отсчетов камеры IC1 (ось абсцисс) за один цикл вывода из ускорителя: а) пучок ядер углерода с энергией 1 ГэВ/нуклон; б) пучок ядер углерода с энергией 4 ГэВ/нуклон

Получены коэффициенты K линейного преобразования числа отсчетов N камеры IC1 в интенсивность I выведенного пучка ($I = KN$). Для энергии пучка ядер углерода 1 и 4 ГэВ/нуклон $K_1 = 7600 \pm 600$, $K_2 = 8300 \pm 400$ соответственно.

Аналогичные измерения проведены на пучках ядер углерода с энергией 3,5 ГэВ/нуклон. Счетчики располагались как до, так и после ионизационных камер с целью выявления влияния дополнительного вещества на пути пучка. Толщина используемых сцинтилляторов — 5 мм по пучку. При внесении 5-мм сцинтиллятора в пучок (ядра углерода с энергией 3,5 ГэВ/нуклон) число отсчетов камеры уменьшается на 2,3%, что существенно меньше погрешности измерений (7–10%). Получен коэффициент линейного преобразования $K_3 = 8600 \pm 400$ для пучка ядер углерода с энергией 3,5 ГэВ/нуклон.

Принимая во внимание, что во многих экспериментальных исследованиях с толстыми мишенями тонкие образцы активационных детекторов располагают на пути пучка перед мишенью, а также перед системами мониторинга пучка, оценим влияние данного фактора на точность измерения интенсивности пучка.

Для оценки влияния внесенного вещества на точность определения интенсивности пучка, падающего на мишень, был проведен ряд измерений с расположением поглотителей из оргстекла с толщинами 1–5 мм и свинца с толщинами 1–3 мм на пути пучка. Данные образцы поглотителей располагались между ионизационными камерами IC1 и IC2 (камера IC2 расположена в 20 см за камерой IC1 по пучку). На рис. 8 показаны графики отношения показаний камеры IC1 к камере IC2 в зависимости от толщины привнесенного поглотителя из свинца. Измерения проводились на пучках дейтронов и ядер углерода с энергиями 2 ГэВ/нуклон (минимум ионизационных потерь).

Измерения показали, что внесение 1 г/см² вещества (10 мм пластика или 1 мм свинца) в пучок перед ионизационной камерой приводит к увеличению измеренной интенсивности пучка ионизационной камерой на 10%.

Анализ интегральных интенсивностей облучения в последних пяти сериях экспериментов с тяжелыми мишенями на выведенных пучках нуклотрона (2013–2015 гг.) показал

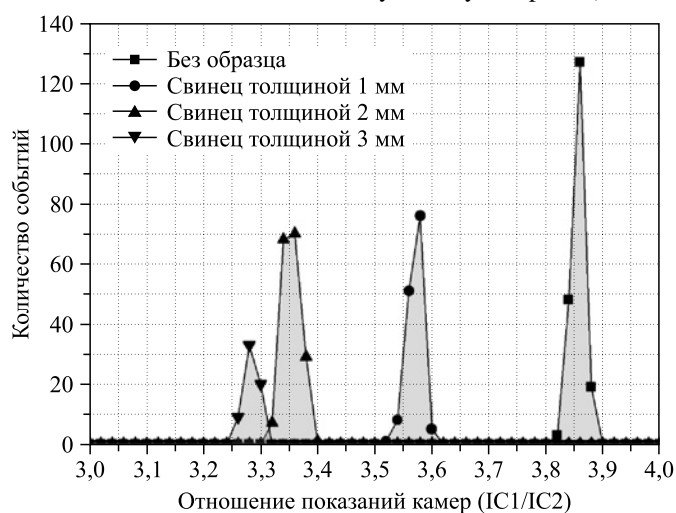


Рис. 8. Графики отношения показаний камеры IC1 к показаниям камеры IC2 в зависимости от толщины привнесенного поглотителя из свинца

согласие между данными, полученными на основе активационного анализа и при помощи ионизационных камер, в пределах 10 %. Следует отметить, что относительные измерения интенсивностей, полученные при помощи всех описанных ионизационных детекторов, согласуются между собой в пределах 5 % для экспериментов на пучках дейтронов и ядер углерода в диапазоне энергии 0,5–4 ГэВ/нуклон. Поскольку ионизационные детекторы работали в процессе проведения экспериментов «Энергия + трансмутация» начиная с 2011 г., а альтернативные активационному методу абсолютные калибровки были проведены позже (2013–2015 гг.), описанные в данной работе результаты позволили уточнить абсолютные величины интегральных интенсивностей при облучениях в более ранних экспериментах. В настоящее время все данные об интегральных интенсивностях облучений, полученные в серии экспериментов 2011–2015 гг. при помощи ионизационных камер и на основе активационной методики, согласуются в пределах 10 %. Отметим, что полученные калибровки для измерений абсолютной интенсивности не повлияли на результаты ранее имеющихся экспериментальных данных для относительной интегральной интенсивности облучений при разных энергиях выведенных пучков в диапазоне 0,5–4 ГэВ/нуклон.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создана и откалибрована система мониторинга выведенных пучков нуклотрона для экспериментов с тяжелыми мишенями. Система позволяет измерять абсолютную интенсивность выведенных пучков с точностью 10 % и контролировать их пространственное положение с точностью 0,5 мм в режиме on-line с паспортизацией и оперативным анализом данных.

Данная работа позволила уточнить результаты экспериментов по облучению тяжелой урановой мишени «Квинта» в серии экспериментов начиная с 2011 г. Проведен анализ факторов, влияющих на ошибки измерений. К основным погрешностям следует отнести человеческий фактор, связанный как с недооценкой влияния на результаты измерения интенсивности пучка «тонких» образцов на его пути перед облучаемой мишенью, так и с методикой анализа активированных образцов, при работе с ППД гамма-спектрометрами.

Предложен и апробирован метод мониторинга пучков на основе секционированных проволочных ионизационных камер, позволяющий осуществлять одновременное измерение интенсивности пучка и его пространственно-временных характеристик с использованием минимального числа каналов регистрации и привнесением малого количества вещества на пути пучка.

Данная работа частично поддержана грантом РФФИ № 4-02-00896 А.

Авторы выражают свою искреннюю благодарность участникам коллаборации «Энергия + трансмутация» за предоставление данных об интегральных интенсивностях пучков, полученных на основе активационной методики, а также Г. В. Трубникову, А. О. Сидорину, В. И. Волкову, С. В. Романову, И. И. Марьину, А. И. Малахову, Е. В. Костюхову и всем сотрудникам службы эксплуатации ускорителя нуклотрон за помощь в работе и полезные обсуждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балдин А. А., Балдина Э. Г. Динамический контроль и оптимизация процесса облучения трековых мембран // Рос. нанотехнологии. 2009. Т. 4, № 9–10. С. 54–62.

2. Васильев С. Е. и др. Разработка системы мониторинга формы, положения и интенсивности выведенного пучка релятивистских ионов ускорительного комплекса нуклотрон-М ОИЯИ // Письма в ЭЧАЯ. 2014. Т. 11, № 6(190). С. 1215–1225.
3. Адам И. и др. (коллораация «Энергия + трансмутация»). Исследование пространственных распределений реакций деления и радиационного захвата нейтронов в массивной урановой мишени, облучаемой дейтронами с энергией 1–8 ГэВ (установка «Квинта»). Препринт ОИЯИ Р1-2012-147. Дубна, 2012. 20 с.
4. Alfassi Z. B. Activation Analysis. V. I, II. Boca Raton, FL: CRC Press, 1990.
5. Wagner V. et al. (“Energy + Transmutation” Collab.). Studies of Deuteron and Neutron Cross-Sections Important for ADS Research // PoS of Baldin ISHEPP XXI. Dubna, 2012.
6. Stopping Powers and Ranges for Protons and Alpha Particles. Report 49 of the Intern. Commission on Radiation Units and Measurements. Bethesda, MD, USA, 1993.
7. Ziegler J. F. The Stopping and Range of Ions in Solids. Pergamon Press, 1985. 321 p.

Получено 7 июля 2015 г.