

Измерительный комплекс для исследования быстропротекающих процессов в подкритическом электроядерном реакторе

А. А. МАЛЬЦЕВ

Описан автоматизированный комплекс детектирующих устройств, предназначенных для коррелированных измерений основных параметров и характеристик быстропротекающих ($\Delta t \approx 1$ мкс) электроядерных и трансмутационных процессов в подкритическом электроядерном реакторе, сопряженном с протонным ускорителем. Комплекс содержит оптико-электронные и спектрометрические детектирующие системы, работающие в режиме реального времени на линии с ЭВМ.

The automated complex of detection of devices, intended for correlated measurements of basic parameters and characteristics of high-speed ($\Delta t = 10^{-6}$ s) electronuclear and transmutation processes in subcritical electronuclear reactor, connected with proton accelerator is described. The complex includes the optic-electronic and the spectrometer detecting systems, working in a mode of a real time on line with the computer.

Утилизация новых и накопившихся радиоактивных отходов атомной промышленности, энергетики, включая шлаки тепловых электростанций и металлургического производства, использующих каменный уголь, — одна из актуальных проблем современности.

В Объединенном институте ядерных исследований (ОИЯИ) давно ведутся работы [1] по поиску, изучению и исследованию экологически чистых и безопасных способов получения атомной энергии и превращению в нейтральные трансмутации активных оружейных и промышленных продуктов, в частности, радиоактивных отходов атомных электростанций. В настоящее время в ОИЯИ прорабатываются альтернативные проекты создания на базе протонных ускорителей синхрофазотрона-нуклотрона [2] и фазотрона [3] различных вариантов промышленных многоцелевых электроядерных установок, способных обеспечить моделирование электроядерного способа получения энергии и изучение эффекта деления долгоживущих трансурановых нуклидов. Важное место в этих проектах занимают комплексные коррелированные измерения различных излучений (инфракрасных, рентгеновских, гамма). Они характеризуют основные параметры и особенности процессов, которые протекают в подкритическом электроядерном реакторе, сопряженном с протонным ускорителем. Сложность состоит в том, что измерения необходимо вести на выходе протонного пучка из ускорительного канала и внутри конструкции сборки реактора, в экстремальных условиях высокого уровня постоянных и импульсных электромагнитных, радиационных и тепловых полей. Это требует развития существующих [4] и разработки новых методов диагностики, преимущественно дистанционных, неразрушающих, безконтактных и не влияющих на исследуемые быстропротекающие процессы.

Чтобы решить поставленную задачу, разработан проект автоматизированного информационно-измерительного комплекса для диагностики процессов, протекающих в электроядерной установке. В основу проекта положен комплекс детектирующей измерительной аппаратуры [5], разработанной, созданной и успешно использованной в ускорительных экспериментах в условиях, близких к условиям

электроядерного эксперимента. Комплекс предназначен для измерения основных параметров и характеристик бомбардирующего мишень пучка релятивистских протонов и исследования процесса взаимодействия протонов и ядер в электроядерной установке, работающей по схеме: протонный ускоритель (энергия протонов 0,6—2,5 ГэВ) — мишень из тяжелого металла (например, урана, свинца, вольфрама) — сборка из стержней с делящимся материалом (U-стержни). Получаемая информация необходима для изучения особенностей различных моделей (макетов и прототипов) с целью создания промышленного подкритического электроядерного реактора с оптимальными технико-экономическими показателями.

На рис. 1 приведена схема электроядерной установки с объектом исследования и основными детекторами диагностического комплекса, регистрирующими оптическое, инфракрасное, гамма- и рентгеновское излучения. Поперечные размеры протонного пучка и распределения плотности частиц на входе в реактор измеряются сцинтилляционным детектором с годоскопическим фотоумножителем [6]. Процесс взаимодействия релятивистских протонов с мишенью из тяжелого металла отслеживается гамма-детектором — сцинтилляционным счетчиком с фотоэлектронным умножителем. Для регистрации ионов по их характеристическому рентгеновскому излучению служит германиевый детектор, охлаждаемый до температуры жидкого азота.

Практическое применение комплекса показано на примере ускорителя-компрессора кольцевых сильноточных ступок низкоэнергетичных релятивистских электронов. Особенность измерений электронных ступок на компрессоре связана с наличием мощной электромагнитной помехи при срабатывании мегавольтного источника электронов; сильного квазистационарного магнитного поля напряженностью до 2,5 Тл системы формирования импульсных магнитных полей ступеней сжатия тороидального ступка; мощного импульса гамма-излучения при взаимодействии электронов с остаточным газом и внутренними элементами конструкции ускорительной камеры; жесткого рентгеновского излучения при захвате электронным кольцом нейтральных атомов;

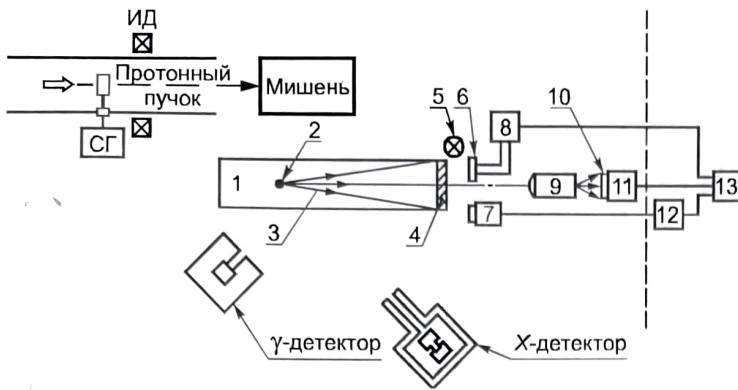


Рис. 1. Схема расположения детекторов относительно объекта исследования:

1 — металлическая камера; 2 — объект исследования; 3 — пучок инфракрасного излучения; 4 — специальное герметичное окно; 5 — контрольный источник; 6, 7 — помехоустойчивые прецизионные интегральные детекторы; 8, 11, 12 — предусилители; 9 — зеркально-линзовый оптический канал; 10 — позиционно-чувствительный однокоординатный детектор; 13 — блоки регистрации, обработки и накопления информации

широкого спектра инфракрасного излучения от 1 до 45 мкм; широкого диапазона измеряемых параметров кольца (энергия электронов $E = 16...20$ МэВ, средний радиус кольцевого сгустка $R = 3...6$ см, диаметр малого поперечного сечения кольца 2—3 мм, число электронов в кольце $N_e = 10^9...10^{13}$ частиц); необходимости регистрации быстропротекающих процессов с временными интервалами от нескольких десятков до сотен микросекунд.

Измерительный комплекс образован из ряда детектирующих автоматизированных оптико-электронных и спектральных систем, работающих в режиме реального времени на линии с ЭВМ. Детектирующие системы содержат индукционные токовые датчики и детекторы излучений: гамма, характеристического рентгеновского и синхротронного инфракрасного. Комплекс предназначен для одновременного измерения нескольких основных параметров (токовых, энергетических, геометрических и т. д.), характеризующих процесс формирования и сжатия кольцевого сгустка релятивистских электронов и взаимодействия заряженных частиц (электронов и тяжелых ионов) в компрессоре.

Процесс диагностики компрессора кольцевых сгустков заряженных элементарных частиц аналогичен диагностике электроядерной установки и включает в себя следующие операции.

Из плоскоцилиндрической камеры 1 компрессора (см. рис. 1) генерируемый сгустком 2 релятивистских электронов (объектом исследования) пучок инфракрасного излучения 3 выводится через специальное прогреваемое высоковакуумное окно 4 [7], пропускающее инфракрасное излучение в широком рабочем диапазоне длин волн. На выходе из компрессора инфракрасное излучение регистрируется помехоустойчивыми прецизионными детекторами 6 и 7 [8], установленными в непосредственной близости от окна 4. Эти детекторы могут измерять дискретную и интегральную интенсивности инфракрасного излучения на различных участках характеристики его спектрального распределения. Часть потока попадает на входной зрачок длиннофокусного широкополосного зеркально-линзового оптического канала 9 [9], который обеспечивает транспортировку излучения с минимальными потерями на заданное (более 2,5 м) расстояние и передачу его на детектор. Излучение фокусируется либо в виде изображения малого поперечного сечения исследуемого сгустка заряженных частиц на чувствительной поверхности координатного детектора 10 [10], с помощью которого изме-

ряются геометрические параметры кольца и распределение электронов по сечению, либо в виде изображения входного зрачка оптического канала на чувствительной поверхности одноэлементного прецизионного детектора-измерителя числа электронов (одного из детекторов 6 или 7).

Инфракрасное излучение регистрируется детектирующими блоками 6, 7, 10 — измерительными преобразователями интенсивности излучения в электрический сигнал, который выделяется на фоне импульсных электромагнитных и радиационных помех ускорителя и усиливается в блоках 8, 11 и 12. Предварительно усиленный аналоговый сигнал по кабельной магистрали подается на пульт управления — на электронные блоки регистрации, обработки и накопления информации 13. Электронные блоки 13 выполнены в стандарте КАМАК и работают на линии с ЭВМ. Обработанные результаты измерений выдаются в требуемом виде и накапливаются в памяти ЭВМ. Контрольный источник 5 служит для проверки и калибровки детекторов.

Входным параметром является ток I пучка низкоэнергетических электронов, инжектируемого из линейного ускорителя в плоскоцилиндрическую вакуумную камеру кольцевого ускорителя — компрессора кольцевых электронных сгустков. Ток I на входе в компрессор измеряется с помощью индукционного датчика — быстродействующего пояса Роговского, имеющего чувствительность 0,3 В/А. В компрессоре из пучка электронов магнитным полем формируется тороидальный сгусток радиусом $R = 40$ см, который затем в течение $t = 2,5$ мс сжимается до радиуса $R = 4$ см.

Потери электронов кольцом за время его формирования и сжатия в компрессоре измеряются сцинтилляционным счетчиком с фотоэлектронным умножителем, установленным на расстоянии нескольких метров от ускорителя. Счетчик регистрирует гамма-излучение (гамма-кванты), возникающее при выбывании электронов из процесса ускорения в результате взаимодействия вылетевших из кольца электронов с остаточным газом и с элементами конструкции (в основном, стенками) вакуумной камеры компрессора.

На заключительном этапе сжатия кольцевого сгустка его наиболее важными характеристиками являются число электронов (ток) и диаметр малого поперечного сечения кольцевого сгустка, так как от этих параметров зависит реализуемость коллективного метода ускорения электронов и тяжелых ионов. Размеры и ток кольца измеряются по его синхротронному излучению. Спектр излучения из-за низкой энергии электронов в основном находится в инфракрасной области.

Для измерения размеров кольца использован позиционно-чувствительный детектор-линейка (чувствительные элементы расположены в одну линию). Ток кольца определяется по интенсивности синхротронного излучения.

Для ее абсолютных измерений предназначены два прецизионных инфракрасных детектора, установленных на входе оптического канала. Один детектор измеряет интенсивность синхротронного излучения в ближней инфракрасной области спектра (длины волн до 1,1 мкм), другой — в средней, в интервале длины волн 1—6 мкм. Это позволяет повысить абсолютную точность измерений.

Для регистрации ионов, захваченных электронным кольцом, служит охлаждаемый до температуры жидкого азота германиевый детектор. Он регистрирует характеристическое рентгеновское излучение ионов после захвата нейтральных атомов, инжектируемых в вакуумную камеру ускорителя.

Сигналы с чувствительных элементов детекторов усиливаются на предусилителях для согласования с линией связи

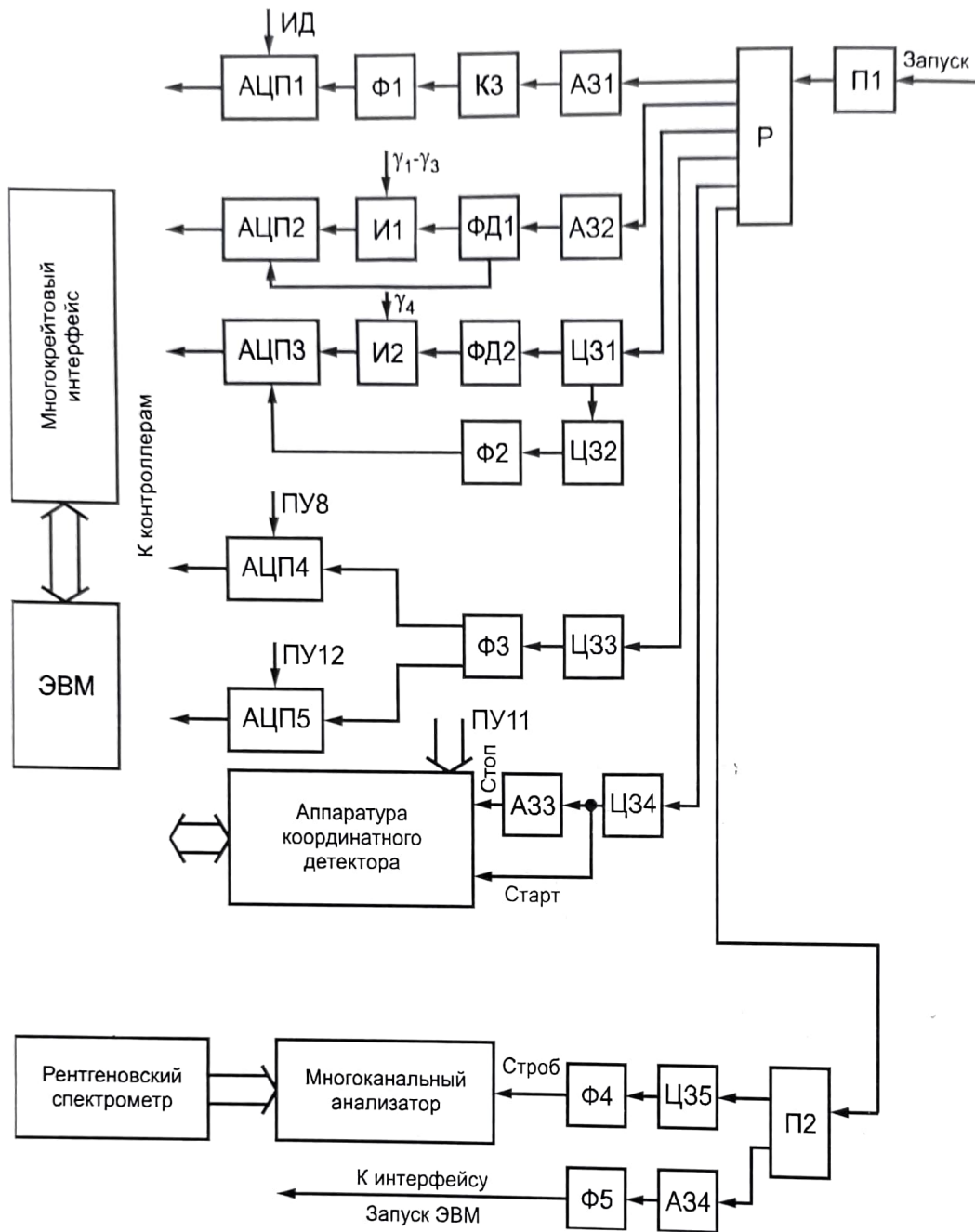


Рис. 2. Структурная схема измерительной аппаратуры комплекса:

П1, П2 — преобразователи уровня; Р — разделитель; А31—А34, Ц31—Ц35, К3 — аналоговая, цифровая и кабельная задержки; ФД1, ФД2 — формирователи диапазона интегрирования; Ф1—Ф5 — формирователи строб-сигнала; И1, И2 — интеграторы; АЦП1 — АЦП5 — аналого-цифровые преобразователи; ПУ1, ПУ2 — предусилители; ПУЛ — предусилитель линейки

и передачи их на электронную аппаратуру, расположенную на расстоянии 50 м.

Основная часть регистрирующей аппаратуры комплекса разработана и изготовлена в ОИЯИ на базе стандарта КАМАК [11]. Она занимает объем четырех крейтов. На рис. 2 показана структурная схема с основными блоками регистрирующей и обрабатывающей электроники комплекса.

Вся аппаратура начинает работать по команде *Запуск* от линейного ускорителя электронов. Данная команда после преобразователя уровня П1 поступает через блок разделителя Р на все измерительные каналы. Сигнал с пояса Роговского, характеризующий силу тока I , инжектируемого в камеру компрессора пучка электронов, регистрируется аналого-цифровым преобразователем АЦП1 по импульсу формирователя Ф1 длительностью 20—100 нс, который задерживается относительно запуска на время 1,2 мкс на блоках аналоговой А31 и кабельной К3 задержек.

Одновременно с инжекцией электронов в камеру компрессора начинаются измерения потерь электронов из формирующегося кольца интегрированием сигналов с ФЭУ (И1, γ_1 , γ_2 , γ_3) и преобразованием суммарных потерь блоками

АЦП2. Для расширения динамического диапазона интегратора И1 использован формирователь диапазона времени интегрирования ФД1, который время сжатия кольца (2,5 мс) разбивает на три интервала интегрирования. Информация в конце каждого интервала заносится в соответствующий АЦП2, после чего интегратор переводится в начальное состояние. Кроме измерения потерь электронов из кольца во время его сжатия, в системе использован еще один канал интегрирования импульсов с ФЭУ (И2, γ_4), который позволяет наблюдать за высадкой на стенки камеры ускорителя электронов кольца после его декомпрессии. Этот канал состоит из двух цифровых задержек Ц31, Ц32, формирователя диапазона интегрирования ФД2, интегратора И2 и формирователя Ф2 строб-сигнала АЦП3. По результатам измерений в этом канале можно судить о количестве электронов в сформированном кольце.

В заключительной стадии формирования кольца электронов через время $t = 1,5$ мс после инжекции пучка в компрессор аппаратура инфракрасной синхротронной диагностики начинает измерения. Задержка на срабатывание регистрирующих каналов с интегральными детекторами 6, 7 и

позиционно-чувствительным детектором 10 (см. рис. 1) обеспечивается блоками Ц33 и Ц34 (см. рис. 2). Сигналы с предусилителей ПУ1 и ПУ2 (11 и 12 на рис. 1) инфракрасных детекторов 6 и 7 регистрируются соответствующими преобразователями АЦП4 и АЦП5.

Аппаратура позиционно-чувствительного координатного детектора 10 (см. рис. 1) запускается по сигналу *Старт* и останавливается по команде *Стоп* через блоки Ц34 и А33 (см. рис. 2). Аппаратура содержит блоки АЦП, буферную память 64×8 бит, логические блоки и блок управления, который генерирует последовательность строб-сигналов для АЦП длительностью 1 мкс и периодом 40 мкс. За этот период в аппаратуре осуществляются преобразование импульсных сигналов, приходящих с ПУЛ — предусилителей линейки (11, см. рис. 1), в коды и передача кодов в буферную память. Время между сигналами *Старт* и *Стоп* определяется временем (0,5 мс) нахождения исследуемой части кольцевого сгустка — малого поперечного сечения электронного кольца — в поле зрения оптического тракта, т. е. в поле видимости детектора. Таким образом, за каждый цикл ускорения электронная аппаратура позиционно-чувствительного детектора осуществляет 12-кратное экспонирование и преобразование сигналов с предусилителей, а также передачу информации в буферную память с периодом 40 мкс за интервал времени между сигналами *Старт* и *Стоп*.

Одновременно с началом измерений размеров кольца включается спектрометрическая аппаратура рентгеновского спектрометра, подключенная к анализатору, после задержки сигнала запуска на блоке Ц35 и формирования стробирующего сигнала на время измерений на формирователе Ф4.

По окончании измерительных процессов запускается в работу многокрейтовый интерфейс через задержку А34 ($t = 20$ мс) и формирователь Ф5. Интерфейс через контроллеры переводит полученные данные в память ЭВМ. Эти данные, обработанные по специальной программе, могут быть выведены на печать и дисплей.

С помощью описанного измерительного комплекса проведены эксперименты по исследованию электронных и электронно-ионных кольцевых сгустков в процессе их компрессии. Некоторые результаты этих экспериментов иллюстрируют рис. 3 и 4 [11].

На рис. 3 показана траектория $R(t)$ электронного кольца на заключительном этапе его сжатия (спадающий участок кривой) и начало декомпрессии кольца (участок подъема), когда магнитное поле отключается и сгусток рассыпается, с высадкой электронов на внутренние стенки ускорительной камеры. Зависимость $I_{\text{си}} / I_{\gamma 4}$ — это угловое распределение интенсивности синхротронного излучения кольца, усредненное по многим импульсам ускорения. Измерение распределения проводили одним из прецизионных детекторов, перемещаемым параллельно оси Z электронного кольца. Счетчик гамма-излучения обратной высадки ($I_{\gamma 2}$, $\gamma 4$ на рис. 2) использовали в качестве монитора. На рис. 3 также приведена зависимость $I_{\text{си}} (I_{\gamma 4})$ между интенсивностью синхротронного излучения $I_{\text{си}}$, измеренной одним из интегральных детекторов, и амплитудой сигнала гамма-излучения $I_{\gamma 4}$ при высадке электронов кольца после его декомпрессии. Данная зависимость имеет практически линейный характер, что позволяет предположить пропорциональность между измеренной интенсивностью синхротронного излучения кольца и количеством электронов в нем. На рис. 4 приведены гистограммы K_{α} и K_{β} линий характеристического излучения ксенона, полученные на рентгеновском спектрометре с германиевым детектором. На рис. 4, а показаны результаты измерений, которые проводили с натекателем нейтральных атомов ксенона в камеру компрессора при дав-

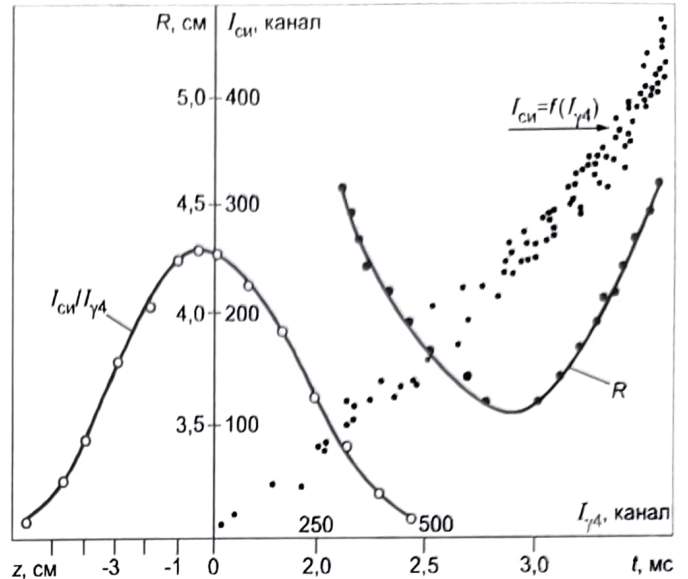


Рис. 3. Траектория равновесного (среднего) радиуса электронного кольца $R(t)$; угловое распределение пучка синхротронного излучения $I_{\text{си}} / I_{\gamma 4}$; зависимость интенсивности синхротронного излучения от числа электронов (тока) в кольце $I_{\text{си}} (I_{\gamma 4})$

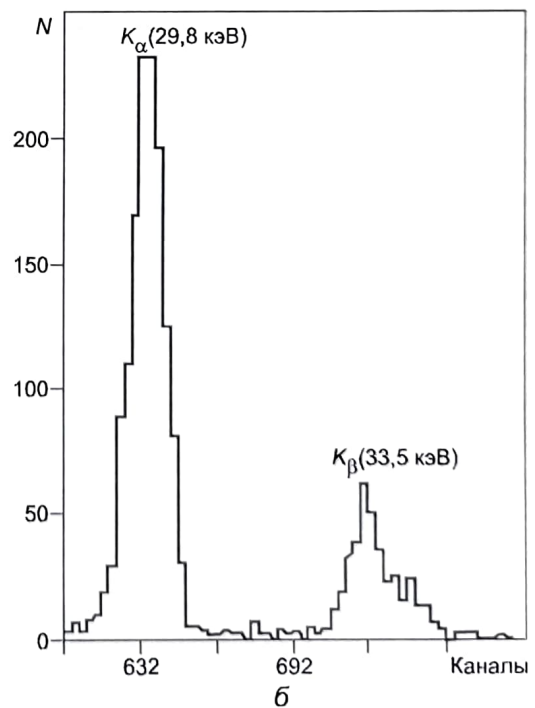
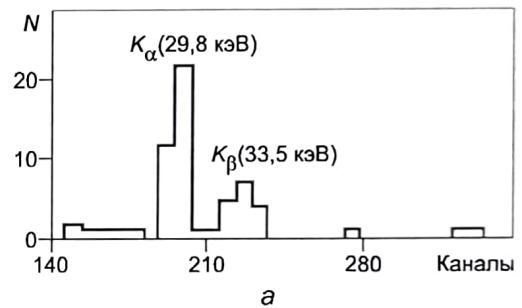


Рис. 4. Гистограммы K_{α} и K_{β} линий характеристического излучения ксенона в статическом режиме инъекции (а) и с использованием газодинамического источника (б), N — число событий

лении в камере от $4 \cdot 10^{-4}$ до $-4 \cdot 10^{-6}$ Па (от $3 \cdot 10^{-6}$ до $-3 \cdot 10^{-8}$ мм рт. ст.). Подобный режим инъекции нейтральных атомов и их захвата электронным кольцом назван статическим. На рис. 4, б приведены гистограммы этих же линий, но при использовании в качестве источника для инъекции газодинамического клапана.

Приведенные результаты измерений достаточно полно характеризуют возможности измерительного комплекса, аппаратура которого обеспечивает измерение основных параметров и характеристик электронных (электронно-ионных) колец, необходимых для настройки ускорителя, контроля и поддержания оптимального режима его работы, а также проведения физических исследований, не вмешиваясь в процессы ускорения.

Использование представленных детектирующих устройств в проекте диагностики подкритического электроядерного реактора позволит с оптимальными затратами и сроками решить проблему, связанную с получением и обработкой первичной информации о параметрах и характеристиках ускорительного релятивистского пучка, бомбардирующего мишень; нейтронных потоков, образующихся в электроядерном реакторе в процессе взаимодействия высокоэнергетических протонов с мишенью и делящимся материалом; энерговыделения и пространственного распределения температурных полей. В частности, температуру и ее распределение в объеме исследуемого реактора можно использовать как обобщенный параметр, прямо связанный с энерговыделением. Этот параметр характеризует электроядерные и трансмутационные процессы и зависит от большого числа электроядерных и неэлектроядерных величин, а также различных помех, которые существенно усложняют проблему.

Именно на регистрации и измерении теплового излучения, генерируемого в электроядерной установке в широком диапазоне инфракрасного спектра, основана калориметрическая методика [4], реализованная в детектирующих информационно-измерительных системах с термопарами. Однако наряду с несомненными достоинствами термопар, такими как неселективность, надежность и стабильность параметров, они имеют ряд существенных недостатков: инерционность (около 1 с), малую чувствительность, необходимость хорошего контакта с поверхностью исследуемого объекта. Эти недостатки не позволяют применять термопары в труднодоступных местах и для диагностики быстротекающих (менее 1 мкс) процессов, исследование которых улучшит

понимание сущности явлений и повысит безопасность эксплуатации электроядерных установок. От таких недостатков свободны полупроводниковые и пьезоэлектрические фотоприемники инфракрасного излучения, успешно использованные совместно с зеркальной и зеркально-линзовой оптикой [12] на базовых установках ОИЯИ в жестких условиях ускорительного эксперимента и показавшие высокую эффективность и надежность [6]. Все это дает уверенность в их применимости для проведения экспериментов и исследований на различных моделях подкритических электроядерных реакторов и в системах безопасности атомных электростанций и энергетических установок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Толстов К. Д. // Моделирование электроядерного способа получения атомной энергии и трансмутации активных отходов / ОИЯИ. — Дубна, 1992. — Сообщение № 18—92—303.
2. Krivopustov M. I. e.a. // Res. Progr. Lab. High Energ. — Dubna, 1999. — P. 135.
3. Buttsev V. S. e. a. // Book Abstrs. Conf. «Experimental Nuclear Physics in Europe Facing the Next Millenium» (ENPE 99). — Sevilla, 1999. — P. 228.
4. Тепловыделение в ядерном реакторе / Под ред. Н. Н. Пономарева-Степного. — М.: Энергоатомиздат, 1985.
5. Воронин С. Г. и др. // Измерительная техника. — 1997. — № 3. — С. 58.
6. Мальцев А. А. // ФЭЧАЯ. — 1996. — Т. 27. — № 3. — С. 797.
7. Мальцев А. А. // ПТЭ. — 1994. — № 3. — С. 177.
8. Мальцев А. А., Мальцев М. А. // Атомная энергия. — 1995. — Т. 79. — Вып. 2. — С. 121.
9. Мальцев А. А., Мальцев М. А. // ПТЭ. — 1995. — № 4. — С. 210.
10. Мальцев А. А. // Физика плазмы. — 1997. — Т. 23. — № 5. — С. 419.
11. Беспалова Т. В. и др. // Тр. X Междунар. симп. по ядерной электронике. — Дрезден, 1980. — С. 44.
12. Мальцев А. А., Мальцев М. А. // Измерительная техника. — 2000. — № 11. — С. 17.

Дата одобрения 21.05.2001 г.