

расположению детекторов для исследуемой критической сборки. Следует заметить, что повышение эффективности детекторов и интенсивности источника значительно уменьшает погрешность измерения данным методом.

Измерения ценности. Возможность дистанционного выключения источника облегчает измерение такого реакторного функционала, как ценность нейтронов деления, по методу измерения роста мощности реактора с введенным источником. Поскольку спектр нейтронов $Po - Be$ -источника отличается от спектра деления, было измерено пространственное распределение ценности нейтронов этого источника, которая на рис. 2 сравнивается с ценностью нейтронов источника ^{252}Cf . Ввиду слабой зависимости ценности нейтронов от энергии пространственные распределения совпадают в пределах погрешности эксперимента.

Выключающийся источник может найти применение в импульсных методиках исследования реакторов, где не требуется анализа времени, сравнимого со временем жизни мгновенных нейтронов. Несомненное преимущество источника — небольшие размеры, позволяющие помещать его в активной зоне без заметных возмущений ее характеристик. Использование выключающегося источника при пусках упрощает процедуру набора критических масс.

Авторы признательны Н. Д. Тюфякову за полезные обсуждения и постоянное внимание к работе, С. П. Сазонову, К. М. Котову, В. В. Владимирову, А. Л. Шмотину, М. Ю. Зайцеву, В. Д. Цвераве и Л. М. Разиной за помощь в проведении измерений и обработке данных.

Поступило в Редакцию 26/VII 1976 г.

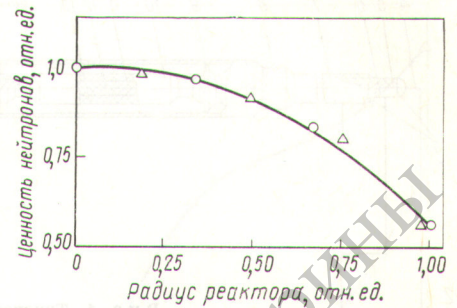
УДК 621.039.562:621.039.566

Внутриреакторная высокотемпературная малогабаритная ионизационная камера

ЕМЕЛЬЯНОВ И. Я., АЛЕКСЕЕВ В. И., ЛИПИН В. Ф., ОЛЬШЕВСКИЙ В. П., ПОСТНИКОВ В. В.,
РЫБАКОВ Ю. В., СТЕКЛОВ В. О.

Повышение экономической эффективности ядерных энергетических установок неразрывно связано с повышением единичной мощности блоков АЭС, с ростом средних удельных тепловых нагрузок ядерного топлива. Поскольку рост последних осуществляется в определенной степени в результате снижения запасов между предельно допустимыми и номинальными нагрузками, а нормы по ядерной и радиационной безопасности АЭС становятся все более жесткими, необходимо значительно повысить требования к точности и надежности датчиков, предназначенных для контроля энергораспределения в реакторе.

Внутриреакторные ионизационные камеры давно и с успехом используются в системах контроля, управления и защиты многих реакторов [1, 2]. Эти камеры безынерционны, имеют сравнительно большой сигнал, обладают при необходимости спектральной чувствительностью, соответствующей энергетической зависимости сечений деления ядерного топлива, а при использовании импульсного и флюктуационного режимов перекрывают широкий диапазон изменения мощности реактора.



Р и с. 2. Ход ценности нейтронов по радиусу критической сборки: Δ — измерения с источником ^{252}Cf ; \circ — настоящая работа ($Po - Be$ -источник)

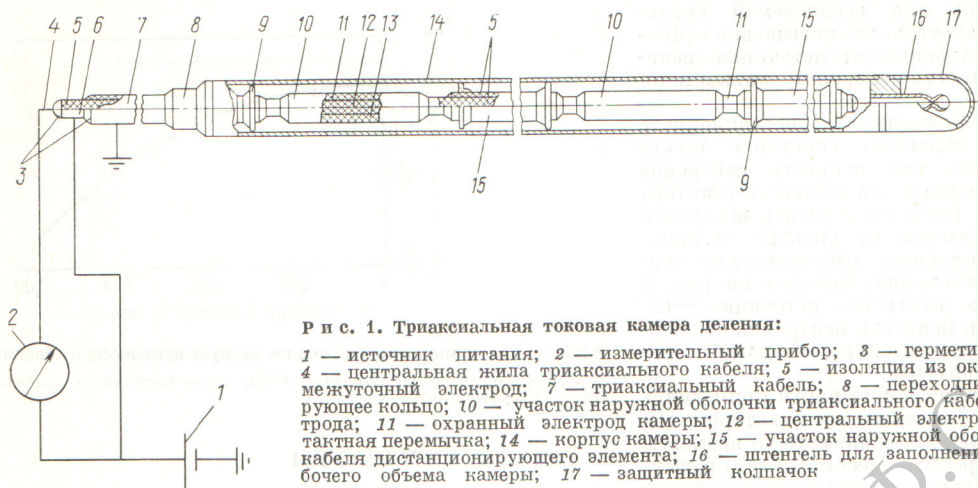
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kenneth H. e. a. In: Proc. Amer. Nucl. Scientific National Topical Meeting «Neutron Sources and Application». Conf.-71 0402, v. 2. Georgia, 19—21 Apr. 1974, p. 190.
2. Клипин Дж. Физические основы кинетики ядерных реакторов. М., Атомиздат, 1967.
3. Hogan W. «Nucl. Sci. and Engng», 1960, v. 8, p. 518.
4. Jankowski F. e. a. «Nucl. Sci. and Engng», 1957, v. 2, p. 288.
5. Бондаренко И. И. и др. III Женевск. конф., 1964. Докл. СССР № 362.

Габариты внутриреакторных камер невелики: наружные диаметры некоторых образцов не превышают 4 мм [3]. Оснащенные регенерирующими покрытиями, камеры слабо изменяют свою чувствительность в течение длительной эксплуатации [4, 5].

Основной недостаток таких внутриреакторных ионизационных камер — сравнительно низкая надежность, что связано с высокими требованиями к сопротивлению изоляции ($>5 \cdot 10^7$ Ом) при высокой температуре и большой плотности нейтронного и γ -поток. Так, для наиболее отработанных камер интенсивность отказов составляет $\sim 15\%$ в год, отмечаются также временные увеличения тока камер, способные привести к ложным срабатываниям системы защиты реактора от превышения мощности [6].

Чтобы повысить надежность внутриреакторных ионизационных камер, в ряде случаев применяют линии связи с охранным электродом, выполненные из триаксиального кабеля с двумя оболочками и центральной жилой их нержавеющей стали, взаимно изолированными спрессованной окисью магния [7]. Однако в этих камерах отсутствует охранный электрод в рабочем



Р и с. 1. Триаксиальная токовая камера деления:

1 — источник питания; 2 — измерительный прибор; 3 — герметизирующие изоляторы; 4 — центральная жила триаксиального кабеля; 5 — изоляция из окиси магния; 6 — промежуточный электрод; 7 — триаксиальный кабель; 8 — переходник; 9 — дистанционирующее кольцо; 10 — участок наружной оболочки триаксиального кабеля собирающего электрода; 11 — охранный электрод камеры; 12 — центральный электрод камеры; 13 — контактная перемычка; 14 — корпус камеры; 15 — участок наружной оболочки триаксиального кабеля дистанционирующего элемента; 16 — штенгель для заполнения и герметизации рабочего объема камеры; 17 — защитный колпачок

объеме камеры, что делает их уязвимыми к падению сопротивления изоляции между корпусом камеры и собирающим электродом.

Другие камеры с охранным электродом в линии связи и в рабочем объеме слишком громоздки и не нашли применения для внутривреакторного контроля.

В настоящей статье приведены технические характеристики и некоторые результаты испытаний внутривреакторной триаксиальной камеры деления [8] диаметром не более 6 мм с охранным электродом в линии связи и в рабочем объеме (рис. 1). Герметичный цилиндрический корпус из коррозионно-стойкой стали диаметром 6 и толщиной стенки 0,3 мм приварен через переходник к наружной оболочке триаксиального кабеля линии связи диаметром 4 мм. Центральный электрод камеры является продолжением центральной жилы триаксиального кабеля, а охранный электрод камеры — продолжением промежуточной оболочки кабеля. По длине наружного электрода триаксиального кабеля в рабочей полости камеры удалены кольцеобразные участки наружной оболочки кабеля и ее изоляции от промежуточного электрода. Часть оставшихся участков наружной оболочки и изоляции из окиси магния вместе с приваренными к ним дистанционирующими кольцами образует дистанционирующие изоляторы, отделяющие охранный электрод от корпуса камеры. Остальные участки наружной оболочки электрически соединены изолированными от охранный электрода перемычками с центральным электродом камеры и служат в качестве собирающего электрода; поверхность этих участков покрыта слоем делящегося материала. Поверхность собирающего электрода после установки перемычки сохраняет свою исходную геометрическую форму. Кроме таких типовых камер были также изготовлены образцы камер с наружными диаметрами 5,0 и 4,0 мм.

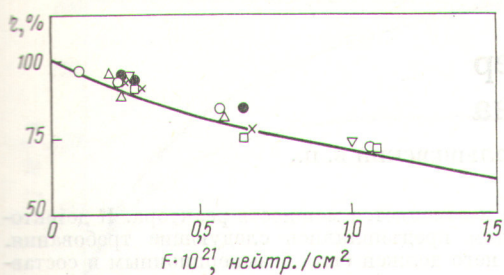
Внутренний объем камер заполнен аргон-гелиевой смесью. Вынос герметизирующих изоляторов из активной зоны, а также исполнение камеры и линии связи как единого целого способствуют повышению ее надежности. При правильном выборе соотношения между объемами газа в камере и в порах изоляции линии связи вплоть до герметизирующих изоляторов изменения чувствительности камеры вследствие перетечек газа между этими объемами сводятся до разумного минимума.

Особенность конструкции камеры также в том, что суммарная длина ее собирающего электрода с делящимся покрытием может быть очень большой. Этот электрод может состоять из секций длиной 10—50 мм, расположенных друг от друга на расстоянии не менее 20 мм. Верхний предел расстояний между секциями и число секций собирающего электрода практически неограниченны. При изготовлении такой камеры требуется только специальная обработка отрезка триаксиального кабеля, поэтому стоимость камеры невелика и находится на уровне стоимости эмиссионных детекторов нейтронов.

При подключении электродов камеры к источнику напряжения (см. рис. 1) в заполненном газом пространстве между секциями собирающего электрода и корпусом камеры возникает ток ионизации, пропорциональный плотности потока нейтронов. На охранный электрод, минуя низкоомный измерительный прибор, подается тот же потенциал, что и на собирающий электрод. Таким образом устраняются возможные фоновые токи между собирающим и охранным электродами, а токи утечки между охранным электродом и корпусом нагружают лишь источник питания и не влияют на показания измерительного прибора. Падение сопротивления изоляции между охранным и собирающим электродом приводит только к шунтированию низкоомного измерительного прибора и поэтому практически не может исказить его показаний.

Наличие охранный электрода как в рабочем объеме камеры, так и в линии связи существенно (на 3—4 порядка) снижает требования к сопротивлению межэлектродной изоляции и обеспечивает работоспособность камер при высоких температурах, вызывающих снижение изоляции и отказ внутривреакторной камеры обычной конструкции. Таким образом, для триаксиальной камеры предъявляются более низкие требования к сопротивлению изоляции по сравнению не только с двухэлектродными камерами, но и с эмиссионными детекторами.

Ухудшение сопротивления изоляции внутривреакторной камеры обычной двухэлектродной конструкции, в которой центральный высоковольтный электрод отделен от заземленного корпуса дистанционирующими изоляторами, приводящее к появлению значительных паразитных токов, обнаруживается по увеличению наклона плато вольт-амперной характеристики.



Р и с. 2. Изменение чувствительности внутриреакторной камеры деления от флюенса тепловых нейтронов:

— расчет; ○, ●, □, △, ▽, × — эксперимент для различных точек активной зоны

Для триаксиальной камеры, установленной в центральном отверстии пароперегревательного канала Белоярской АЭС и работавшей при 650—700 °С, были измерены вольт-амперные характеристики в диапазоне от 0 до 200 В сразу после ее установки и после 17 мес работы, когда флюенс тепловых нейтронов в камере достиг $5 \cdot 10^{20}$ нейтр./см². Напряжение $U_{0,9}$ составило соответственно 11 и 8 В при токах 16 и 14 мкА, а наклон плато вольт-амперной характеристики был равен 0,012 и 0,03%/В, т. е. находился заведомо ниже допустимого предела.

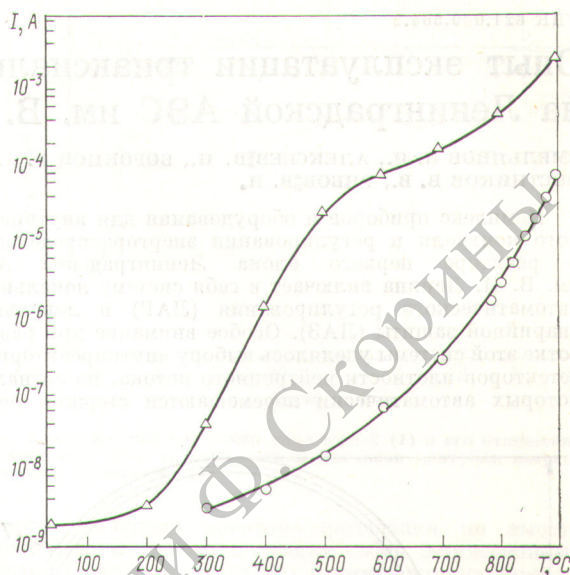
Другие измерения вольт-амперных характеристик триаксиальной камеры, работающей при ~80 °С и плотности потока тепловых нейтронов $2,5 \cdot 10^{14}$ нейтр./(см²·с), проведенные в различные моменты ее эксплуатации, включая период, когда флюенс тепловых нейтронов в камере составил $3 \cdot 10^{21}$ нейтр./см², показывают практическую неизменность плато вольт-амперной характеристики, имевшего наклон не более 0,02%/В.

Наличие охранного электрода в камере приводит к уменьшению наклона плато вольт-амперной характеристики вследствие устранения эффекта утечки тока по изоляции и выравнивания электрического поля в рабочем объеме камеры. Благодаря низким требованиям к сопротивлению изоляции триаксиальные камеры деления обеспечивают надежность в течение длительной эксплуатации в реакторе.

Сигнал от камеры изменяется линейно с изменением локальной мощности в диапазоне 1—100% уровня мощности реактора с приведенной погрешностью не более 0,2%. Рабочее напряжение на электродах триаксиальных камер 60—120 В. Чувствительность триаксиальных внутриреакторных камер составляет $(1 \div 5) \cdot 10^{-18}$ А(см²·с)/нейтр., к γ -излучению — $(1 \div 5) \cdot 10^{-14}$ (А·ч)/Р.

На рис. 2 приведены экспериментальная и расчетная зависимости чувствительности триаксиальной камеры деления с покрытием из ²³⁵U 90%-ного обогащения от флюенса тепловых нейтронов.

Для оценки верхней температурной границы применимости камер деления этой конструкции были сняты на реакторе зависимости фонового тока камеры от



Р и с. 3. Зависимость фонового термического тока триаксиальной камеры с охранным электродом (○) и без него (△) от температуры элементов конструкции

температуры. Фоновый ток при температуре выше 800 °С, по-видимому, обусловлен низкотемпературной эмиссией электронов с поверхности электродов камеры. Из рис. 3 видно, что камеры можно использовать до температуры 750 °С: при токе камеры ~100 мкА вклад фонового тока не превысит 1%.

Описанные триаксиальные камеры деления [8] могут быть использованы в качестве высоконадежных внутриреакторных датчиков СУЗ высокотемпературных ядерных реакторов, в частности быстрых реакторов.

Поступило в Редакцию 3/IX1976 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Емельянов И. Я. и др. «Атомная энергия», 1970, т. 29, вып. 4, с. 298; вып. 5, с. 327.
2. Емельянов И. Я. и др. «Атомная энергия», 1971, т. 30, вып. 3, с. 275.
3. «Nucl. Engng Intern.», 1970, v. 15, N 170/171.
4. Дмитриев А. Б. и др. «Атомная энергия», 1967, т. 22, вып. 4, с. 314.
5. Щетинин О. И. и др. «Атомная энергия», 1970, т. 28, вып. 2, с. 164.
6. Wirth W. In: Rep. Panel «Instrumentation for Nuclear Power Plant Control». Vienna, 17—21 Nov. 1969, IAEA-119.
7. Боланд Дж. Приборы контроля ядерных реакторов. М., Атомиздат, 1973.
8. Алексеев В. И. и др. «Бюл. изобрет.», 1976, № 29, с. 212.