

УДК 621.039.564.2

Опыт эксплуатации триаксиальных камер на Ленинградской АЭС им. В. И. Ленина

ЕМЕЛЬЯНОВ И. Я., АЛЕКСЕЕВ В. И., ВОРОНЦОВ Б. А., ЛИПИН В. Ф., ОЛЬШЕВСКИЙ В. П., ПОСТНИКОВ В. В., РЯБОВ В. И.

Комплекс приборов и оборудования для внутризонного контроля и регулирования энергораспределения в реакторе первого блока Ленинградской АЭС им. В. И. Ленина включает в себя систему локального автоматического регулирования (ЛАР) и локальной аварийной защиты (ЛАЗ). Особое внимание при разработке этой системы уделялось выбору внутрореакторных детекторов плотности нейтронного потока, по сигналам которых автоматически перемещаются сержни регу-

лирования и изменяется мощность реактора. К детектору при этом предъявлялись следующие требования. Сигнал от него должен быть безынерционным и составлять на номинальной мощности реактора ~100 мкА. Детектор должен в течение двух лет надежно работать в центральной полости гильзе теплоизолирующей сборки (ТВС) с внутренним диаметром 6,5 мм при средней плотности нейтронного потока $5 \cdot 10^{13}$ нейтр./(см²·с) и температуре окружающей среды ~300 °С. Расположение чувствительных элементов детектора должно быть в двух модификациях таким, чтобы в одном случае детектор правильно характеризовал интегральную плотность нейтронного потока по высоте ТВС, а в другом — локальные значения плотности нейтронного потока. Этим требованиям удовлетворяют триаксиальные камеры деления [1, 2].

На реакторе первого блока ЛАЭС длительное время работают триаксиальные камеры деления двух типов (КтВ-2 и КтВ-3), предназначенные соответственно для измерения локальной и интегральной плотности нейтронного потока. Первоначально в реактор было установлено 18 камер КтВ-2 и 22 камеры КтВ-3. Камера КтВ-3 (рис. 1) имеет три чувствительные секции длиной 50 мм, равномерно размещенные по длине корпуса. В камере КтВ-2 две такие же чувствительные секции, размещенные на расстоянии 50 мм друг от друга в корпусе длиной 240 мм. В остальном конструкция камер идентична.

Линия связи этих камер выполнена из обычного триаксиального кабеля (наружный диаметр 4 мм), имеющего взаимно изолированные спрессованной окисью магния наружную и промежуточную оболочки и центральную жилу из коррозионно-стойкой стали. Корпус камеры приварен через переходник к безразъемной линии связи. Максимальный диаметр камеры в активной зоне реактора составляет 6 мм.

Поверхность каждой секции собирающего электрода (площадь 6,25 см²) покрыта слоем урана толщиной 0,1 мг/см² с обогащением 2% по ²³⁵U. Зазор между корпусом камеры и собирающим электродом составляет 0,7 мм. Внутренний объем камер заполняется аргон-гелиевой смесью (95% Ar и 5% He) до давления 380 мм рт. ст. Выведенный из корпуса камеры триаксиальный кабель проходит конструкцию подвески, выполненную в виде трубки со стальными защитными втулками и узлом герметизации, и заканчивается герметизирующими изоляторами.

В другом, более позднем варианте камера КтВ-3 была оснащена малогабаритным герметичным, высокотемпературным разъемом на выходе из полости гильзы ТВС с герметизирующими кабель изоляторами со стороны камеры и линии связи. При подключении электродов камеры к источнику питания в заполненном газом пространстве между секциями собирающего электрода и корпусом камеры возникает ток ионизации, пропорциональный плотности нейтронного потока на собирающих электродах. На охранный электрод, минуя низкоомный измеритель тока, подается тот же потенциал, что и на собирающий электрод.

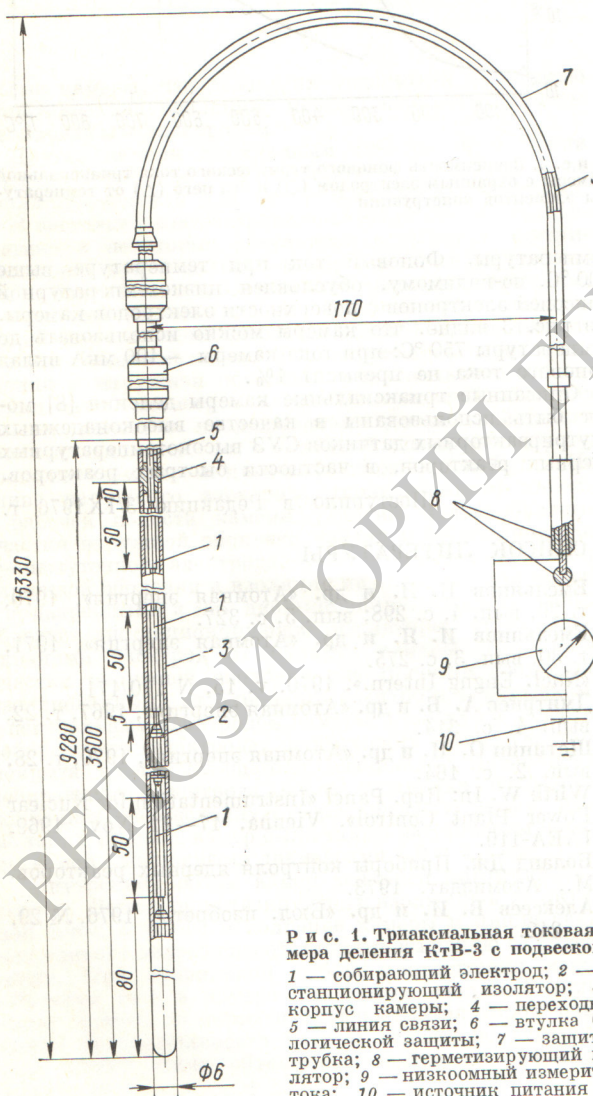


Рис. 1. Триаксиальная токовая камера деления КтВ-3 с подвеской:
1 — собирающий электрод; 2 — дистанционирующий изолятор; 3 — корпус камеры; 4 — переходник; 5 — линия связи; 6 — втулка биологической защиты; 7 — защитная трубка; 8 — герметизирующий изолятор; 9 — низкоомный измеритель тока; 10 — источник питания

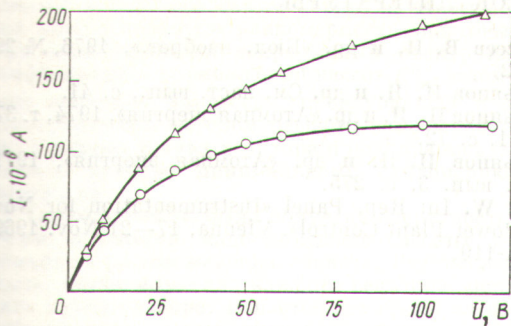


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики камеры КтВ-2 через ~ 17 000 ч эксплуатации при измерении с включенным (○) и отключенным (△) охраняемым электродом

Сигнал от камер КтВ-2 и КтВ-3 составляет на номинальной мощности реактора $(1,5 \div 2) \cdot 10^{-4}$ А, рабочее напряжение 100 В. Наклон плато вольт-амперной характеристики камер КтВ-2, измерившейся в течение первых 17 000 ч эксплуатации, не превышал $5 \cdot 10^{-2} \%$ /В. Межэлектродная изоляция внутриреакторных камер деления других типов является, как известно, их наименее надежным конструкционным элементом.

Триаксиальные камеры деления оставались работоспособными при снижении сопротивления изоляции до $5 \cdot 10^3 - 1 \cdot 10^4$ Ом, чему способствовал правильный выбор характеристик источников питания. Сопротивление изоляции между электродами триаксиальных камер во время их эксплуатации периодически контролировалось методом снятия вольт-амперных характеристик отдельно по охранному и собирающему электродам путем регулируемого изменения напряжения между ними.

Поскольку при отключении охранного электрода триаксиальная камера мало отличается от обычной двухэлектродной камеры, во время испытаний сравнивались камеры этих двух типов путем измерений при подключении и отключении охранного электрода от источника напряжения (рис. 2). Доля работоспособных камер для двухэлектродной камеры КтВ-2 (с отключенным охраняемым электродом) при эксплуатации в течение 3600 и 17 000 ч составила соответственно 61 и 13%, для триаксиальной камеры КтВ-2—100 и 83%. При этом камера с отключенным охраняемым электродом считалась неработоспособной при снижении сопротивления изоляции между центральным электродом и корпусом ниже $5 \cdot 10^7$ Ом. Полные отказы камер КтВ-2 с подключенным охраняемым электродом происходили в результате короткого замыкания в цепи охраняемого электрода — корпус. За один год эксплуатации камер КтВ-3, технология изготовления которых более совершенна, не наблюдалось отказов среди всех 22 первоначально установленных камер (при подключенном охраняемом электроде). Эти данные указывают на существенно большую надежность камер триаксиальной конструкции.

Следует отметить, что при отключении охранного электрода увеличивался наклон плато даже у камер, обладающих достаточно высоким сопротивлением изоляции, что связано с ухудшением равномерности электрического поля в объеме камеры без охраняемого электрода, с отсутствием в этом случае режима насыщения вблизи торцов собирающего электрода.

Для изучения линейности показаний камер КтВ-2 использовались измерения сигналов отдельных секций

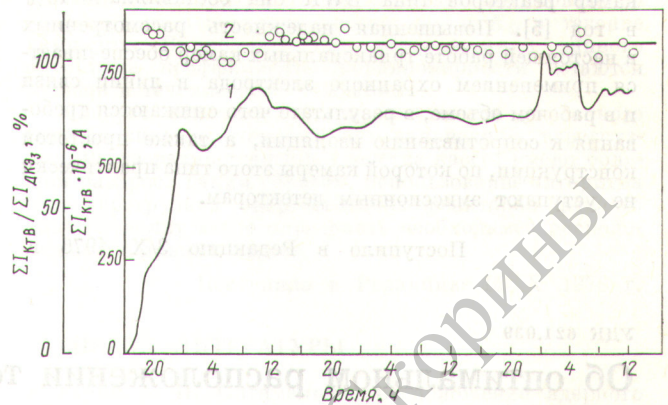


Рис. 3. Суммарный ток камер типа КтВ-2 (1) и его отношение к суммарному току третьих секций датчиков контроля энерговыделения по высоте (2)

датчиков контроля энергораспределения по высоте активной зоны, представляющих собой β-эмиссионные детекторы нейтронов (БЭДН) с эмиттером из серебра [3, 4] (рис. 3). При этом использовались секции БЭДН, расположенные в соседних технологических каналах на одном уровне с триаксиальными камерами.

На рис. 4 приводятся данные для отдельной камеры КтВ-3. Сигнал ее сравнивается с суммарным сигналом соседних БЭДН, длина чувствительной части которых равна высоте активной зоны.

На рис. 3 и 4 видно, что максимальные отклонения от линейности показаний КтВ-2 и КтВ-3 составляют соответственно 6 и 7%, средние квадратические отклонения 2,5 и 3%. По-видимому, эти отклонения обусловлены инерционностью датчиков БЭДН, одновременностью снятия показаний датчиков и возможным изменением соотношения потоков и спектра нейтронов в местах установки БЭДН и триаксиальных камер при подъеме мощности.

Воздействие интенсивных потоков тепловых нейтронов на нейтронно-чувствительный радиатор камеры приводит к «выгоранию» последнего и, как следствие, к изменению чувствительности камеры. Эксплуатация показала, что изменение чувствительности внутриреакторных камер совпадает с расчетной кривой «выгорания» радиатора.

Известна интенсивность отказов различных внутриреакторных детекторов. Так, для внутриреакторных

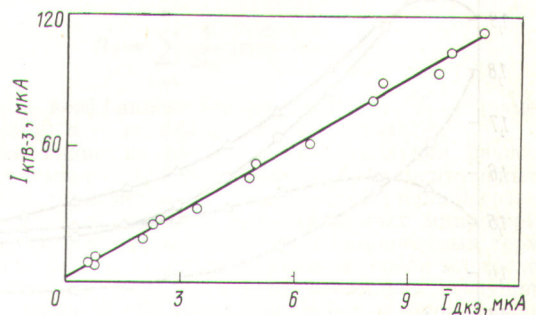


Рис. 4. Зависимость сигнала камеры КтВ-3 от среднего тока соседних интегральных датчиков контроля энерговыделения

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

камер реакторов типа ВВР она составляла ~15% в год [5]. Повышенная надежность рассмотренных в настоящей работе триаксиальных камер обеспечивается применением охранного электрода в линии связи и в рабочем объеме, в результате чего снижаются требования к сопротивлению изоляции, а также простотой конструкции, по которой камеры этого типа практически не уступают эмиссионным детекторам.

1. Алексеев В. И. и др. «Бюл. изобрет.», 1976, № 29, с. 212.
2. Емельянов И. Я. и др. См. наст. вып., с. 41.
3. Емельянов И. Я. и др. «Атомная энергия», 1974, т. 37, вып. 1, с. 72.
4. Емельянов И. Я. и др. «Атомная энергия», 1971, т. 30, вып. 3, с. 275.
5. Wirth W. In: Rep. Panel «Instrumentation for Nuclear Power Plant Control». Vienna, 17—21 Nov. 1969, IAEA-119.

Поступило в Редакцию 3/Х 1976 г.

УДК 621.039

Об оптимальном расположении топливных кассет в реакторе

АЙРАПЕТЯН И. Н., АРУТЮНЯН Г. Г., ОВСЕПЯН А. В.

Вопросы оптимизации распределения размножающих свойств по реактору для различных геометрий рассматривались в работах [1, 2]. При этом делались предположения о непрерывности свойств среды и не принималось во внимание наличие поглощающих элементов. Для реальных гетерогенных систем с большим числом топливных кассет, учитывая результаты работ [1, 2] и проводя пробные численные расчеты, можно найти распределение размножающих свойств по реактору, соответствующее наибольшей кампании, выгоранию или другим заранее поставленным условиям. Однако при эксплуатации реактора всегда есть определенный набор кассет, отличающийся от требуемого в идеальном случае, и возникает задача распределения имеющихся кассет таким образом, чтобы они обеспечивали наилучшее приближение к идеальному рассчитанному варианту. В настоящей работе предлагается алгоритм, осуществляющий хорошее приближение расположения любого заданного набора кассет к идеальному варианту в смысле минимума суммы квадратов отклонений размножающих свойств.

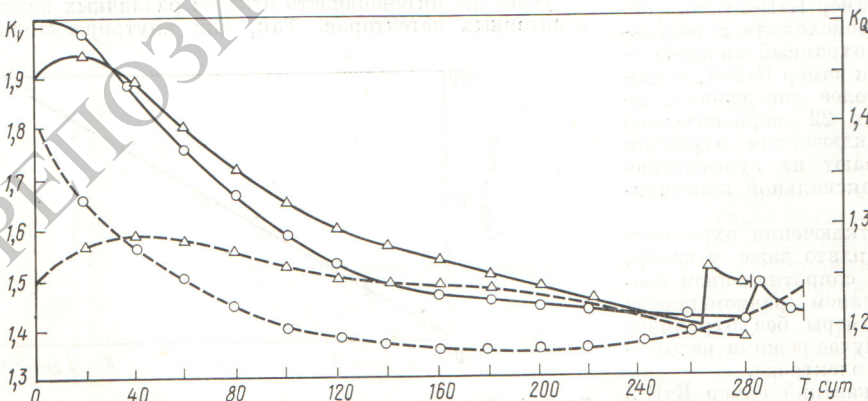
минимума S :

$$S = \sum_{i, k} (a_{ik} - b_{ik})^2.$$

Построим монотонную последовательность a_n -элементов матрицы \hat{A} , располагая их в ряд по возрастанию или убыванию, а также монотонную последовательность b_n -элементов матрицы \hat{B} . Если привести эти монотонно убывающие или возрастающие последовательности в соответствие, а затем распределить элементы b_n в матрицу \hat{B} на места, соответствующие элементам a_n в матрице \hat{A} , то \hat{B} окажется лучшим приближением к \hat{A} при заданном наборе элементов b_n , поскольку при этом из монотонности последовательностей a_n и b_n будет следовать минимальность S . Очевидно, что при выполнении условия минимума суммы квадратов отклонений автоматически выполняется также условие минимума наибольшего локального отклонения соответствующих элементов матриц. Доказательства этих утверждений тривиальны и здесь не приводятся.

По предложенному алгоритму были проделаны контрольные расчеты реактора типа ВВЭР-440. Рассчитана первая кампания со стандартными кассетами, расположенными как произвольным образом, так и по приведенному алгоритму. Для разработки идеального варианта предполагалось, что имеется непрерывный спектр размножающих свойств кассет, которые распо-

Пусть задана матрица \hat{A} , соответствующая наилучшему распределению размножающих свойств по гетерогенному реактору. Число элементов матрицы a_{ik} равно числу независимых топливных кассет. Задана также матрица \hat{B} с таким же числом элементов b_{ik} , которые требуется распределить так, чтобы выполнялось условие



Зависимость коэффициентов неравномерности энергораспределения по объему K_V (—) и по кассетам K_Q (---) от времени:
 Δ — произвольное расположение кассет; \circ — расположение кассет по предлагаемому алгоритму