

Отложения на твэлах АЭС ВК-50

А. И. ЗАБЕЛИН, Б. В. ПШЕНИЧНИКОВ, Т. С. СВЯТЫШЕВА

УДК 621.039.524.4—97:621.03.955.336

Водо-водяной кипящий корпусной реактор ВК-50 представляет собой цилиндрический корпус со съемной крышкой. Наплавка корпуса и крышки выполнены из аустенитной стали 1X18Н9Т. Рабочее давление в реакторе 70—100 кг/см².

Топливный объем зоны, так называемая малая активная зона (МАЗ), состоит из 91 кассеты. Скорость естественной циркуляции теплоносителя в период нахождения в активной зоне рассматриваемой кассеты была равна 0,5 м/сек. Средняя энергонапряженность активной зоны составляла 36 кВт/л.

Характер отложений зависит от теплофизических и гидродинамических условий работы тепловыделяющих сборок и состава примесей теплоносителя. Последние, в свою очередь, являются функцией водно-химического режима и коррозионно-эрозионной стойкости конструкционных материалов. Площадь контакта конструкционных материалов с теплоносителем приведена ниже (% к общей площади):

Латунь (Л-68)	52,1
Углеродистая сталь (Ст. 3, Ст. 20, Ст. 22к)	39,4
Нержавеющие стали (1X18Н9Т, 1X13, 3X13)	5,6
Цирконовые сплавы	3,2

Скорость коррозии и выход ее продуктов в теплоноситель зависят от качества теплоносителя (табл. 1). Продукты коррозии, переходя с поверхности корродирующих материалов в теплоноситель, активируются в активной зоне реактора и мигрируют в контуре.

В настоящей работе приведены некоторые результаты, полученные при изучении отложений на поверхности твэла, проработавшего в реакторе 155 эфф. суток с начала эксплуатации. Время выдержки составило более 10 месяцев.

Отбор и методика анализа проб

Визуальный осмотр поверхности твэла показал, что последний покрыт пленкой продуктов коррозии красно-бурого цвета. На расстоянии 1 м от верхней части твэла в местах нарушений верхней пленки виден белый налет.

Соскобленные с поверхности твэла пять проб представляли собой чешуйчатые образования,

трудно растворимые в кислотах даже при нагревании. Химический состав отложений определяли по стандартным физико-химическим методикам.

Кроме того, эти же образцы подвергались спектрометрическому анализу по γ -излучению. В качестве детектора использовался фотоумножитель ФЭУ-56 с кристаллом NaI(Tl) размером 70 × 70 мм. Импульсы с детектора усиливались серийным широкополосным усилителем типа УИС-2 и поступали на амплитудный импульсный многоканальный анализатор типа АИ-256. Спектры γ -излучения, получаемые на анализаторе, записывались на цифронечатающее устройство БЗ-15 и самопишущий электронный потенциометр ЭПП-09.

Разрешение спектрометра на линии γ -излучения Cs¹³⁷ (0,661 Мэв) составляло 10%. Питание ФЭУ-56 осуществлялось от серийного источника стабилизированного напряжения типа ВС-22. Флюктуации выходного напряжения от номинального значения при изменении напряжения питающей сети на 10% составляли не более 0,01%.

На γ -спектре, показанном на рис. 1, в области энергий больше 0,2 Мэв четко видны четыре пика: 0,511; 0,835; 1,120 и 1,330 Мэв. Указанные пики можно интерпретировать как фотопики от γ -квантов Mn⁵⁴ (0,834 Мэв), Zn⁶⁵ (1,120 Мэв) и Co⁶⁰ (1,330 Мэв), исключение составляет пик 0,511 Мэв. Последний является фотопиком аннигиляционного излучения позитронов, образующихся при распаде Zn⁶⁵. Таким образом, гамма-спектрометрия проб позволила определить в отложениях присутствие радиоактивных изотопов Mn⁵⁴, Zn⁶⁵ и Co⁶⁰.

Основные показатели
водно-химического режима

Таблица 1

Физико-химические показатели	Теплоноситель		
	питательная вода	вода реактора	пар реактора
Величина pH	8,3	9,5	—
Растворенный кислот, мг/кг	0,05	0,20	30,00
Сумма продуктов коррозии, мг/кг	0,50	1,00	0,05

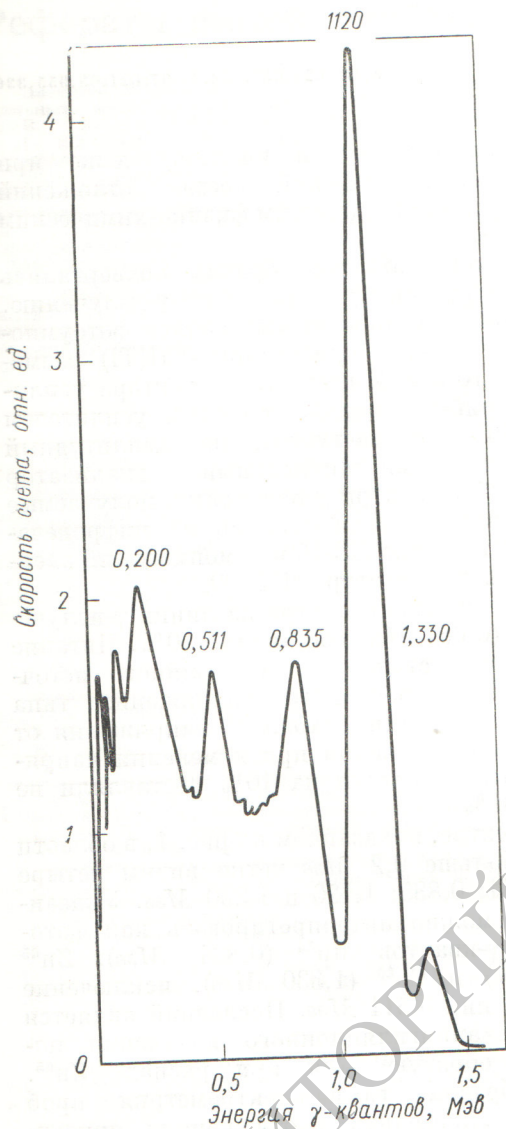
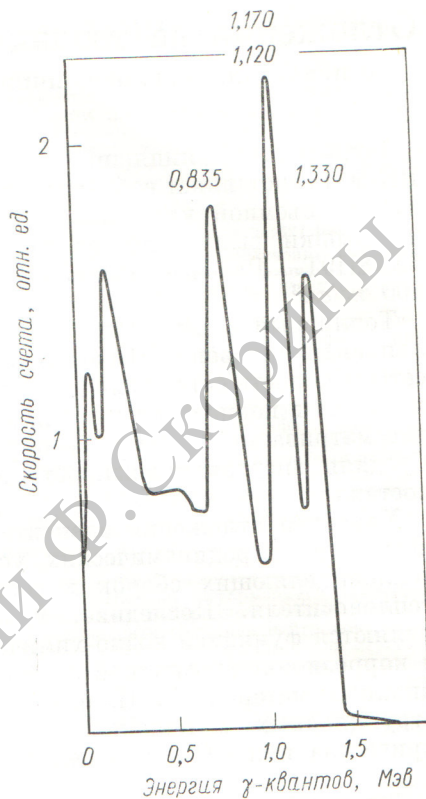


Рис. 1. Типичный γ -спектр отложений на твэ-ле BK-50.

В отложениях могли быть также изотопы Na^{22} , Fe^{59} , Co^{58} , Zr^{95} + Nb^{95} . Однако фотопики от γ -квантов Na^{22} (1,277 Мэв), Fe^{59} (1,289 и 1,098 Мэв) и Co^{60} (1,170 Мэв) лежат в области фотопика от γ -квантов Zn^{65} (1,120 Мэв) и Co^{60} (1,330 Мэв). Максимум спектра комптоновских электронов от γ -квантов Zn^{65} и фотопики от γ -квантов Co^{58} (0,805 и 0,814 Мэв) и Zr^{95} + Nb^{95} (0,756; 0,723; 0,768 Мэв) находятся в области фотопика Mn^{54} (0,835 Мэв). Для выяснения присутствия изотопов, фото-

Рис. 2. Спектр γ -излучения отложений на твэ-ле BK-50, обедненной цинком.



пики которых замаскированы сильными линиями, были проведены контрольные опыты.

Навеску соскобленной пробы сплавляли с пятикратным избыточным количеством кислого сернокислого калия (KHSO_4) в муфельной печи при температуре 900—950° С. Полученный сплав растворяли в 20%-ной соляной кислоте при нагревании и разбавляли обессоленной водой. Полученный раствор пропускали через хроматографическую колонку, затем с помощью радиохимических методов выделяли смесь изотопов или отдельные изотопы.

Фильтровальную бумагу, смоченную в соответствующе приготовленных растворах, запаивали в полиэтиленовый пакет и определяли γ -спектр пробы.

Спектр обедненной цинком пробы приведен на рис. 2. Из сравнения полученного γ -спектра с первичным (см. рис. 1) видно, что интенсивность фотопика Zn^{65} заметно уменьшилась, в связи с чем возрос фотопик Co^{60} (1,330 Мэв). Вследствие уменьшения пика аннигиляционного излучения начал проявляться пик в районе 0,6 Мэв, являющийся максимумом спектра комптоновских электронов от γ -квантов 0,835 Мэв. Как видно из рис. 2, новых линий γ -излучения в спектре не обнаружено.

Усредненное содержание элементов в отложениях продуктов коррозии на твэле

Таблица 2

Химический состав отложений		Источники происхождения	
элемент	содержание, вес. %	узлы и оборудования контура	конструкционные материалы
Железо	39,0	Конденсаторы турбины, конденсатный тракт, деаэраторы, тракт питательной воды, паропровод, турбина Внутриреакторные поверхности, паропровод до СВД*, коллектор питательной воды, жалюзийные устройства СВД и СНД**, установка для выпаривания, рабочие лопатки турбины, винты СУЗ Трубная система конденсаторов турбины и ПНД***	Углеродистая сталь (Ст. 3; Ст. 20; Ст. 22 и) Нержавеющая сталь (1Х18Н9Т, и 0Х18Н10Т) и хромистая (1Х13 и 3Х13) стали; Латунь (Л-68)
Марганец	5,0		
Никель	0,5		
Хром	0,2		
Медь	35,0		
Цинк	20,0	Подъемники питательных насосов, наплавка третьей и четвертой ступеней цилиндра низкого давления турбины	Стеллит (45—50% кобальта) и сплав Т15К6 (6% кобальта)
Кобальт	≤ 0,1		

* Сепараторы высокого давления.
** Сепараторы низкого давления.
*** Подогреватели низкого давления.

Затем из обедненной цинком пробы, полученной в предыдущем контрольном опыте, химическим путем выделялся натрий. Причем γ -спектр пробы, обедненной цинком и натрием, не отличался от γ -спектра пробы, обедненной только цинком. Для проверки присутствия в пробе Na^{22} и Fe^{59} были проведены повторные опыты по определению содержания этих изотопов с применением независимых методов. Из рабочей пробы выделялся кобальт. Одновременно с кобальтом был выведен и марганец. Полученный γ -спектр пробы совпадал с γ -спектром чистого Zn^{65} . Дополнительно был проверен фильтрат тех же проб. Новых линий γ -излучения в спектрах не обнаружено.

Соотношение радиоизотопов в отложениях на твэлах является специфическим для каждой АЭС и зависит от применяемых конструкционных материалов [1].

Обсуждение результатов измерений

В аликвотных объемах исследованных растворов пяти соскобленных проб были найдены элементы коррозионно-эрозионного происхождения (железо, марганец, хром, никель, медь, цинк) и естественные примеси воды (кальций, магний, кремний).

Из табл. 2 видно, что отложения состоят в основном из соединений железа (39%), меди (35%) и цинка (20%). Значительно меньше в отложениях содержится марганца и совсем мало никеля и хрома. Заметных количеств циркония и ниобия (элементов продуктов кор-

розии материала оболочек твэлов) не обнаружено.

В табл. 3 приведено соотношение активностей продуктов коррозии изотопов Zn^{65} , Mn^{54} и Co^{60} , рассчитанное на момент остановки реактора. Как указывалось выше, исследуемый твэл находился в бассейне выдержки более 10 месяцев. За это время активность всех других изотопов уменьшилась настолько, что фотошки от их γ -квантов оказались замаскированными значительно более сильными линиями γ -излучения (в основном от Zn^{65}). Обращает на себя внимание тот факт, что более 90% активности проб обусловлено γ -излучением Zn^{65} , который образуется по реакции $Zn^{64}(n, \gamma)Zn^{65}$ (распространенность 48,89%). На основании этого можно заключить, что в случае одноконтурной схемы, аналогичной АЭС ВК-50, для улучшения радиационной обстановки, по-видимому, не следует применять латунь в качестве конструкционного материала контура.

Соотношение радиоизотопов в отложениях на твэле (%)

Таблица 3

Радиоизотоп	Относительная активность *
Mn^{54}	2,5±0,4
Zn^{65}	92,0±3,7
Co^{60}	5,1±0,4

* Средняя из пяти проб.

Изотоп Mn^{54} в основном образуется по реакции (n, p) из изотопа Fe^{54} (его распространенность 5,81%) [2] и значительно меньше по реакции ($n, 2n$) из Mn^{55} (его распространенность 100%). Таким образом, активность Mn^{54} пропорциональна концентрации продуктов коррозии железа. Изотоп Co^{60} образуется в основном по реакциям $Co^{50}(n, \gamma) Co^{60}$ (распространенность 100%) и $Ni^{60}(n, p) Co^{60}$ (распространенность 26,16%). В связи с тем что кобальт в результате химического анализа в пробах не обнаружен, можно предположить, что в основном изотоп Co^{60} образуется по второй реакции из никеля.

Выводы

1. Для АЭС ВК-50 по сравнению с другими АЭС с реакторами кипящего типа характерно высокое содержание в отложениях соединений

меди и цинка, что обусловлено применением латуни в конденсаторе турбины и ПНД, работающих в первом контуре.

2. Основной составляющей отложений на твэле, обуславливающей ~90% долгоживущей радиоактивности, является изотоп Zn^{65} .

3. Несмотря на весьма малые размеры поверхностей из нержавеющей стали, в отложениях все-таки обнаружен Co^{60} .

Поступила в Редакцию 4/V 1972 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коррозия конструкционных материалов водоохлаждаемых реакторов. Под ред. В. П. Погодина. М., Атомиздат, 1965.
2. И. П. С е л и н о в. Изотопы (справочные таблицы). М., «Наука», 1970.

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

Авторы, направляющие свои рукописи в журнал «Атомная энергия», должны руководствоваться следующими требованиями.

1. Тексты и иллюстративные материалы представляются в четырех экземплярах в окончательном отработанном для печати виде.

Содержание статьи должно быть изложено с предельной ясностью и краткостью. Следует избегать повторения данных таблиц и графиков, а также представления численных результатов в виде таблиц и графиков одновременно.

2. Объем обзорных статей, как правило, не должен превышать 20—22 стр., оригинальных статей — 10—12 стр., аннотаций депонированных статей — 2 стр., писем в редакцию — 5 стр. машинописного текста (включая рисунки с подписями, таблицы и библиографию).

3. К статьям и письмам в редакцию должны быть приложены рефераты, составленные по правилам реферативных журналов, с четко сформулированной целью и результатами работы.

4. Статьи и рисунки должны быть подписаны всеми авторами. К рукописи необходимо приложить точный адрес, номер телефона, фамилию, полное имя и отчество авторов.

5. Названия всех работ, присылаемых в редакцию, должны быть переведены на английский язык, фамилии и инициалы авторов даны в английской транскрипции. Кроме того, рефераты к статьям должны быть переведены на английский язык (в строгом соответствии с русским рефератом).

6. Цитируемая литература приводится в конце работы общим списком с указанием:

а) для журнальных статей: инициалов и фамилий авторов, названия журнала, номера тома (подчеркнуть)

или выпуска, страницы и года (в круглых скобках);

б) для книг: инициалов и фамилий авторов, полного названия книги, места издания, издательства и года издания; для иностранных книг указываются также данные русского перевода;

в) для статей в сборниках: инициалов и фамилий авторов статьи, названия сборника, инициалов и фамилии составителя или редактора сборника, части, выпуска, места издания, издательства, года и страницы.

Ссылки на неопубликованные работы не допускаются. 7. Текст рукописей должен быть напечатан на машинке через два интервала по 28—29 строк на одной стороне листа с полями не уже 4 см; рукописные вставки не допускаются.

8. Оформление текста (написание формул, выделение греческих и латинских, строчных и прописных букв, сокращение слов и т. д.) производится в соответствии с общими правилами, принятыми для научно-технических журналов. Трудно различимые в рукописном обозначении буквы и знаки должны быть пояснены на полях.

9. Прилагаемые к тексту таблицы нумеруются по порядку, каждая таблица должна иметь заголовок.

10. Рисунки выполняются черной тушью на бумаге размером 15 × 20 см; фотографии должны иметь контрастные изображения, размер фотографии 12 × 18 см.

11. Подписи к рисункам прилагаются на отдельном листе. В тексте должны быть ссылки на рисунки.

12. Редакция посылает автору только одну копию, которую необходимо вернуть в предельно короткий срок.

Рукописи, не соответствующие этим требованиям, не рассматриваются. Отклоненные статьи не возвращаются.