

ДИАГНОСТИКА ПРОЦЕССОВ МЕХАНИЧЕСКОГО ИЗНОСА ЯДЕРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА РАДИОАКТИВНЫХ ПРИМЕСЕЙ В МАСЛЕ

Описан алгоритм диагностирования технического состояния подвижного отражателя (ПО) исследовательского реактора ИБР-2, который основан на анализе радиоактивных примесей в масле. Результаты анализа примесей использовались для определения момента зарождения и развития процессов деградации конструктивных элементов. По количественному содержанию радиоактивных изотопов в масле оценивалась скорость износа механических деталей подвижного отражателя.

Ключевые слова: подвижный отражатель, механический износ, ядерное оборудование, радиоактивные примеси, нейтронноактивационный метод анализа.

Введение. Подвижный отражатель – механический модулятор реактивности представляет собой роторную машину с горизонтальным расположением валов, который находится вблизи активной зоны исследовательского реактора ИБР-2. Общий вид отражателя показан на рис. 1. Подробное описание отражателя дано в работах [1, 2].

В процессе эксплуатации реактора в конструктивных элементах ПО, в том числе и в масле, циркулирующем по системе смазки ПО, накапливается наведенная радиоактивность. Образующиеся при трении деталей мелкие частицы материалов выносятся маслом из подвижного отражателя, так что величина радиоактивности масла на выходе из отдельных узлов пропорциональна количеству таких частиц и скорости износа трущихся деталей. Каждый химический элемент дает свое специфическое гамма-излучение. Измерение гамма-спектров, появляющихся в масле радиоактивных примесей, позволяет определить изнашиваемый материал и контролировать скорость износа.

Анализ гамма-спектров радиоактивных примесей в масле, включая продукты износа, показал на присутствие в спектре более 70 линий различных радиоактивных изотопов. Все наблюдаемые значимые изотопы (а их более 20) можно условно разделить на две группы. Первая группа изотопов появляется в результате активации нейтронами примесей, содержащихся в чистом масле. Это примеси Na, Cl, Br, As, Se, P, Sb, Ba. Содержание этих примесей не меняется со временем, и их активность зависит от баланса времени облучения и времени распада. Вторая группа изотопов появляется в результате смыва и выноса маслом микрочастиц от конструктивных элементов подвижного отражателя. Это, в первую очередь,

металлы Fe, Co, Ni, Mo, W, Zn, Cr, Cd, Cu. Количество таких примесей возрастает с выработкой ресурса подвижного отражателя и может служить мерой износа узлов отражателя.

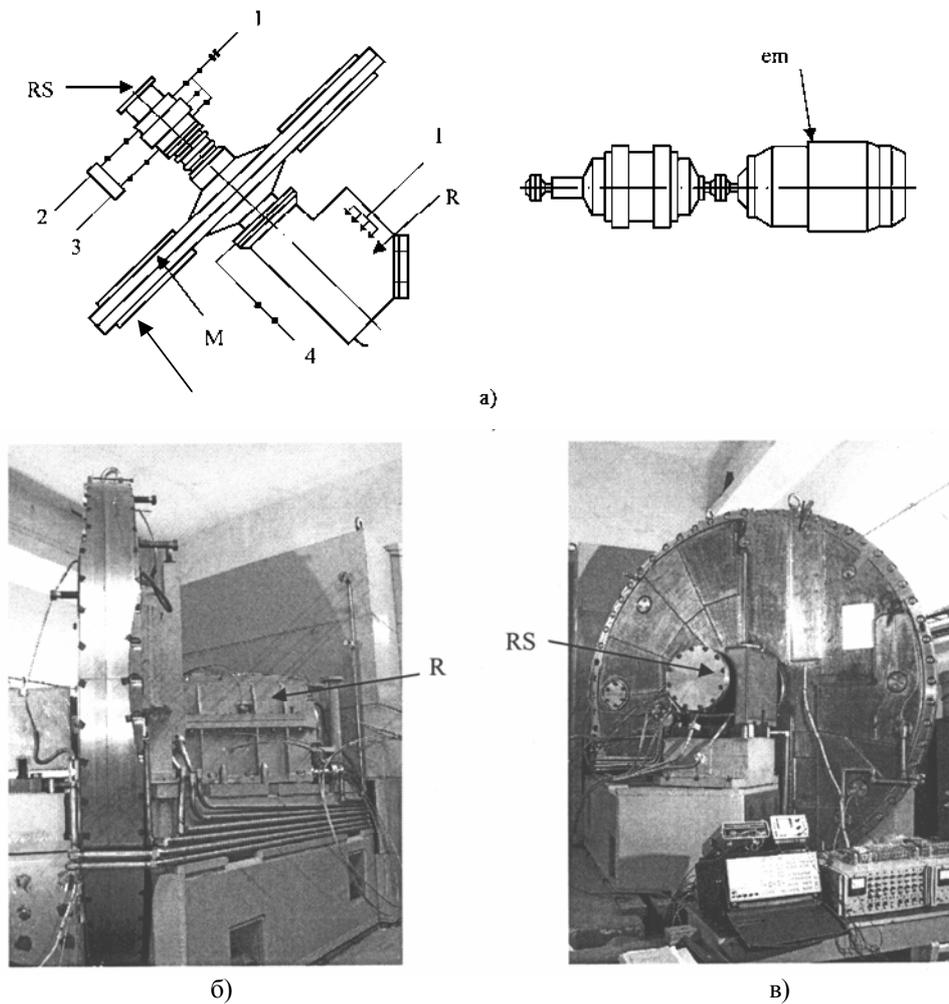


Рис. 1. Подвижный отражатель: а) – схема отбора масла в системе смазки; б) – вид ПО сбоку; в) – вид ПО со стороны передней опоры; М – модуляторы реактивности, RS – передняя опора, R – редуктор.

Более надежные результаты получаются из относительных измерений периодически отбираемых проб масла. Для проведения таких измерений в системе маслопроводов ПО были установлены четыре пробоотборных поста: на входе в ПО 1, на выходе из основного опорного подшипника 2, на выходе из радиально-опорного подшипника 3 и на выходе из редуктора 4 ПО. Схема отбора проб масла из системы смазки отражателя показана на рис 1.

Методика исследований. Спектральный анализ масла для контроля состояния двигателей впервые был использован в США на железнодорожном транспорте в 1942 г. Затем данный метод нашел широкое применение во

многих отраслях, особенно при эксплуатации самолетов, некоторых судов. Например, в работе [3] отмечается, что только лишь в 1964 г. ведомство ВМФ США контролировало около 3500 самолетных двигателей и передач. Совершенно очевидно, что наличие металлических частиц в масле являются индикаторами износа конструктивных элементов. В последние годы широко используются два метода спектрального анализа: эмиссионная спектрометрия и атомная абсорбционная спектрометрия [3]. В данной работе был использован нейтроноактивационный метод.

Спектры гамма-излучения проб масла в подвижном отражателе ИБР-2 измерялись на низкофоновом германиевом спектрометре высокого разрешения с калиброванной эффективностью. Продолжительность измерения каждой пробы составляла 1000 минут. Четыре идентичных пробы масла объемом по 100 мл отбирались в конце каждого двухнедельного цикла работы реактора ИБР-2 и обмерялись с помощью гамма-детектора (реактор работает в циклическом режиме – примерно по 10 циклов в году, по 300 ч в каждом цикле). Чтобы учесть медленные изменения активности изотопов, связанные с режимом работы реактора, результаты измерений проб выходного масла нормировались на величину текущей активности соответствующего изотопа во входном масле.

Несмотря на высокую чувствительность нейтроноактивационного метода анализа (содержание наблюдаемых примесей не превышает 10 миллиграмм на литр), количественное измерение содержания примесей затруднено тем, что величина нейтронного потока, активирующего примеси и различные продукты износа элементов подвижного отражателя, а также время нахождения масла в нейтронном поле неизвестны. Эти параметры облучения (поток нейтронов и время облучения) можно только приближенно оценить из дополнительных измерений проб масла.

Вместе с тем учитывалось также, что абсолютные значения интенсивности спектральных линий зависят не только от количества примесей в масле, но и от ряда других характеристик: сечения и выхода реакций, спектра нейтронов, времени облучения, эффективности регистрации излучения и т.д.

Основные результаты исследования. В измеряемых спектрах основной интерес представляли элементы, входящие в состав изнашиваемых стальных деталей ПО: Fe, Cr, Co, Ni. Относительное содержание этих элементов в масле ПО определялось по линиям: 320 кэВ из реакции $^{50}\text{Cr}(n,\gamma)^{51}\text{Cr}$, 810 кэВ из реакции $^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}$, 834 кэВ из реакции $^{54}\text{Fe}(n,p)^{54}\text{Mn}$, 1099 кэВ из реакции $^{58}\text{Fe}(n,\gamma)^{59}\text{Fe}$, 1173 кэВ из реакции $^{59}\text{Co}(n,\gamma)^{60}\text{Co}$.

При проведении измерений было отмечено, что относительная активность металлических примесей Co-60, Fe-59, Zn-65, Mn-54, Co-58 и Cr-51 в пробах входного масла, в зависимости от времени, меняется. За начальный уровень были приняты результаты первого цикла эксплуатации. Наблюдаемые вариации относительной активности объясняются ее ростом в период работы реактора на мощности и распадом радиоактивных изотопов в период остановки реактора. Эти изменения тем заметнее, чем меньше период полураспада соответствующего изотопа.

С учетом изменений относительной активности, связанных с режимом работы реактора, можно считать, что содержание примесей в масле на входе в подвижный отражатель за период наблюдений оставалось достаточно стабильным. Разброс значений в измерениях активности проб масла, взятых в аналогичных условиях, не превышает $\pm 20\%$.

Абсолютные значения активности проб входного масла, взятых в качестве примера после 41 цикла эксплуатации (12500 ч.), приведены в табл. 1.

Таблица 1

Абсолютные значения активности проб входного масла

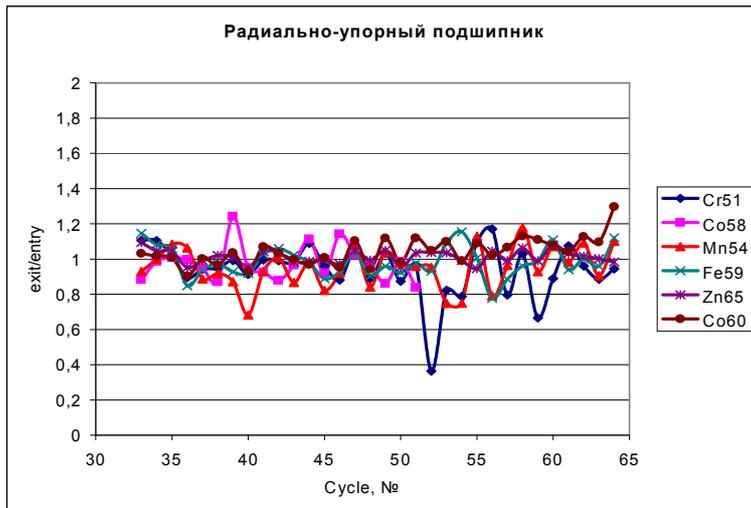
| Изотоп | Cr-51 | Co-58 | Mn-54 | Fe-59 | Zn-65 | Co-60 |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Активность Бк/л | 153 | 6 | 15 | 88 | 887 | 106 |

На рис. 2,а и 2,в приведены результаты измерений проб масла на выходе из радиального и радиально-упорного подшипника подвижного отражателя. Можно констатировать, что в пределах $\pm 30\%$ активность масла на выходе подшипников постоянна и заметного увеличения содержания примесей в выходном масле подшипников не наблюдается.

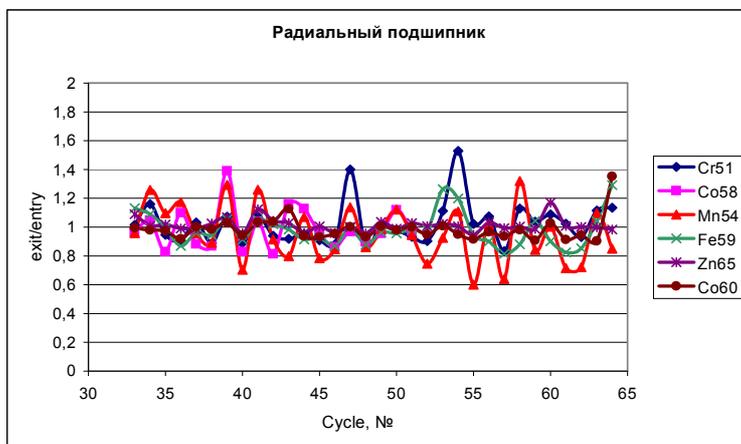
Картина заметно иная в пробах масла, выходящего из редуктора ПО. На рис. 2,с видно, что активность Co-60, Fe-59, Cr-51 и Mn-54 в выходном масле редуктора заметно выше, чем соответствующие активности во входном масле. Более того, наблюдается тенденция к увеличению этого отношения со временем. При этом активность Zn-65 и Co-58 остается неизменной. Можно сделать заключение, что эти микрочастицы принадлежат детали, изготовленной из хромистой стали. Подтверждением этого утверждения могут служить результаты сопоставления активностей наблюдаемых изотопов, с результатами, вычисленными с помощью формулы определения интенсивности гамма-линий:

$$N = (N_A/A) \cdot M \cdot F \cdot \sigma \cdot I \cdot C \cdot \varepsilon \cdot t \cdot (1 - \exp(-\lambda \cdot t_1)) / (1 - \exp(-\lambda \cdot t_2)) \quad (1)$$

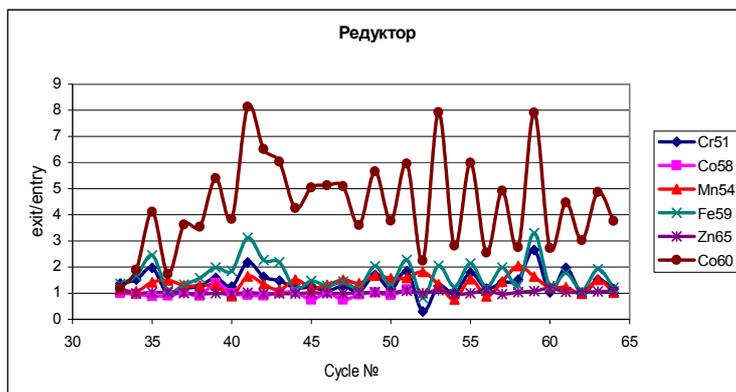
где N – число импульсов в аналитической линии элемента за время измерения t ; N_A – число Авогадро; A – атомный вес элемента; M – масса примеси, грамм; F – эффективный поток нейтронов, нейтр./см²/с; σ – сечение реакции, барн; I – относительный выход аналитической линии γ -квантов на распад; C – относительное содержание активируемого изотопа в естественной смеси изотопов; ε – эффективность регистрации гамма-квантов детектором; $\lambda = 0,693/T_{1/2}$ – постоянная распада наблюдаемого изотопа, $T_{1/2}$ – период полураспада; $t_1 = 11$ суток – время работы реактора на мощности в одном цикле; $t_2 = 30$ суток – время повторения циклов работы реактора.



а)



б)



в)

Рис. 2. Зависимость активности радиоактивных изотопов в масле от выработки ресурса: а) – основного радиального подшипника передней опоры; б) – радиально-упорного подшипника передней опоры; в) – редуктора.

В табл. 2. приведены значения этих параметров для рассматриваемых металлов.

Таблица 2

Значения параметров изотопов

| Изотоп | E_{γ} , кэВ | I | Σ , barn | C | $T_{1/2}$, дней | E |
|--------|--------------------|--------|-----------------|-------|------------------|-------|
| Cr-51 | 320,1 | 0,0983 | 15,900 | 0,044 | 27,7 | 0,043 |
| Mn-54 | 834,8 | 1,000 | 0,083 | 0,059 | 312,5 | 0,021 |
| Co-58 | 810,8 | 0,994 | 0,060 | 1,000 | 70,96 | 0,021 |
| Fe-59 | 1099,2 | 0,565 | 0,501 | 0,003 | 44,50 | 0,017 |
| Co-60 | 1173,2 | 0,999 | 18,650 | 1,000 | 1923,60 | 0,016 |
| Zn-65 | 1115,5 | 0,508 | 0,760 | 0,489 | 243,90 | 0,017 |

Полагая, что все примеси активировались одинаковым потоком тепловых нейтронов, используя формулу (1), после 41 цикла эксплуатации (12500 ч) получим: $M_{Cr}/M_{Fe} = (0,004 \pm 0,001)$, $M_{Co}/M_{Fe} = (0,001 \pm 0,0001)$, $M_{Zn}/M_{Fe} = (0,002 \pm 0,01)$.

Такое соотношение элементов соответствует химическому составу хромистой стали.

Кобальт-58 и марганец-54 образуются в реакциях на быстрых нейтронах из никеля-58 и железа-54. Используя формулу (1) и данные из табл. 2, получим: $M_{Ni}/M_{Fe} = (0,003 \pm 0,006)$, что свидетельствует практически о полном отсутствии никеля в примеси.

Незначительные, в пределах $\pm 20\%$, и нерегулярные отклонения активностей различных элементов в масле из основного радиально-упорного подшипника (рис. 2,а) и в масле радиального подшипника (рис. 2,в) по сравнению с активностью тех же элементов во входной напорной линии связаны, по-видимому, с погрешностью измерений и не показывают износа металла подшипников. Напротив, активность хрома-51, железа-59, марганца-54 (из реакции $^{54}Fe(n,p)^{54}Mn$) и особенно кобальта-60 в масле из редуктора в несколько раз и коррелированным образом превышает активность этих элементов во входном масле (рис. 2,с).

Из приведенных данных можно видеть, что наблюдаемая активность примесей в масле подвижного отражателя ИБР-2 обусловлена выносом металлических микрочастиц из редуктора ПО и связана с износом шестерен редуктора. Результаты измерений указывают на постоянное увеличение скорости износа. В примесях присутствует цинк и кадмий. Оба этих элемента входят в состав латуни сепараторов подшипников. К сожалению, анализ этих примесей затруднен из-за короткого периода полураспада кадмия-115 (2,23 дня) и значительной примеси цинка в чистом масле.

Для оценки степени чистоты масла в контурах смазки, а их использовалось два - первый и второй, включавшихся поочередно в нечетные и четные циклы работы реактора, были взяты пробы масла из соответствующих отстойников масляных контуров. В пробах масла редуктора, взятых из отстойника первого контура, визуально наблюдалось наличие мелких частицы металла с максимальными размерами до 0,4 мм и

толщиной ~ 0,05 мм. Эти частицы (общим весом ~ 1–2 мг) были извлечены из масла и измерен спектр их гамма-излучения, показавший наличие в них железа-59, хрома-51 и кобальта-60. Качественно такой состав элементов соответствует химическому составу материала шестерен редуктора (легированная низкохромистая сталь марки 40X). Поэтому наблюдаемые флуктуации активности проб, взятых в четные и нечетные циклы реактора (см. рис. 2), частично можно объяснить различной эффективностью накопления металлических микрочастиц в отстойниках двух масляных контуров.

Чтобы устранить эффект накопления примесей в отстойнике был проведен анализ активности примесей в пробе масла редуктора, взятой сразу после их промывки. Результат измерений совпал с данными измерений проб, полученных в четных циклах работы реактора с 2-м контуром, т.е. накопление примесей имело место только в отстойниках 1-го контура и содержание выносимой примеси железа в масле из редуктора составляет ~ 2,0 мг/л. При скорости потока масла через редуктор 10 л/ч за цикл работы реактора (250 ч может выноситься до 5,0 грамм примесей).

Количественный анализ металлических примесей непосредственно из измерений активности проб масла ПО провести сложно, поскольку точно неизвестен поток нейтронов, облучающих ПО и время накопления активности. Для решения этой задачи проба масла объемом 20 мл, дополнительно взятая из редуктора, была облучена в течение суток на канале № 3 реактора калиброванным потоком нейтронов. Обработка результатов измерений показала, что содержание железа в пробе составила 5,0 мг/литр, содержание хрома по отношению к железу – 0,4%, содержание марганца – 0,5%, содержание кобальта – 2,5%. Чувствительность нейтрон-активационного анализа к кобальту в 250 раз выше, чем чувствительность к железу, поэтому активность кобальта-60 оказывается выше, чем активность железа-59 даже при низком содержании кобальта в стали.

К сожалению, в справочниках не указывается содержание кобальта в хромистых сталях. Отсутствие образцов стали шестерен подвижного отражателя не позволило провести аналогичный нейтрон-активационный анализ этой стали. Но такой анализ был проведен на образцах стали элементов опорного подшипника, облученных на канале № 3 ИБР-2. Результаты анализа приведены в табл. 3.

Таблица 3

Содержание хрома и кобальта в подшипнике 218

| Элемент подшипника | Хром, % | Кобальт, % |
|--------------------|---------|------------|
| Внешняя обойма | 1,5 | 0,01 |
| Внутренняя обойма | 1,5 | 0,01 |
| Шарик | 0,2 | 0,007 |
| Сепаратор стальной | 0,002 | 0,0002 |

Из табл. 3 следует, что содержание кобальта в подшипниковой стали очень мало и не соответствует измеренному количеству кобальта в масле подвижного отражателя.

Содержание цветных металлов – цинка и меди в масле подвижного отражателя по результатам проведенного анализа составляет 0,2 мг/л и 0,1 мг/л соответственно. Количество этих металлов остается постоянным во всех измерениях и примерно равным их содержанию в чистом масле. Постоянным остается и содержание в масле отражателя кадмия, отсутствующего в чистом масле, но содержащегося в латунном сепараторе подшипников. Возможно, примесь кадмия осталась в масле после разрушения подшипника предыдущего подвижного отражателя ПО-1.

Заключение. 1. Для идентификации деградируемых элементов в процессе эксплуатации перед вводом нового оборудования следует располагать базовыми результатами нейтроноактивационного метода анализа материалов всех контролируемых узлов.

2. Использование для диагностики нейтроноактивационного метода, в комбинации с виброакустическими методами, позволяет более точно обнаружить развитие процессов разрушения деталей оборудования на ранней стадии их зарождения.

3. Пробный анализ радиоактивных примесей в масле и химического состава элементов подшипников и шестерен подвижного отражателя ПО-2 позволил локализовать и идентифицировать деградируемый элемент отражателя. На завершающей стадии эксплуатации ПО-2 зафиксирован повышенный износ шестерен редуктора подвижного отражателя. Износа элементов подшипников не обнаружено.

Summary

The report describes the algorithm for diagnosing the technical state of the movable reflector in the IBR-2 research reactor, which is based on analyzing radioactive impurities in oil. The impurity analysis results were used to establish the onset and development time of the structural component degradation processes. The quantitative content of radioactive isotopes in oil was used to assess the wear rate for the movable reflector's mechanical parts.

Keywords: movable reflector, mechanical wear, nuclear equipment, radioactive impurities, neutron activation method of analysis.

Резюме

Описано алгоритм діагностування технічного стану рухомого рефлектора дослідного реактора ИБР-2, який оснований на аналізі радіоактивних домішок в маслі. Результати аналізу домішок використовувалися для визначення моменту зародження і розвитку процесів деградації конструктивних елементів. За кількісним складом радіоактивних ізотопів в маслі оцінювалася швидкість зносу механічних деталей рухомого рефлектора.

Ключові слова: рухомий рефлектор, механічний знос, ядерне обладнання, радіоактивні домішки, нейтронно-активаційний метод аналізу.

1. *Sizarev V. D., Evropin S. V., Sokolova A. G., Balitsky F. Ja.* Vibration condition monitoring as a mean of service life management of IBR-2 movable reflector modulator. Proc. of “The Fifth Intern. Confer. Monitoring and Machinery Failure Prevention Technologies”, CM 2008/MFPT 2008. Edinburgh, Scotland, UK, 2008.
2. *Evropin S.V., Sizarev V. D., et al.* Vibroacoustical diagnostics of the movable reflector - modulator of the IBR-2 pulsed research reactor’, Proceedings of The 1st International Symposium on Stability Control of Rotating Machinery – ISCORMA-1, South Lake Tahoe, California, USA, 20-24 August 2001.
3. *Коллаком Р. А.* Диагностирование механического оборудования (перев. с англ.). – Л.: Судостроение, 1980.

Поступила 27.05.2009