

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПОКАЗАНИЙ СЕКТОРНОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ГЕРМЕТИЧНОСТИ ОБОЛОЧЕК ТВЭЛОВ РЕАКТОРА БН-600 ОТ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ

О.И. Албутова, Д.А. Лукьянов

АО «ГНЦ РФ -ФЭИ» им. А.И. Лейпунского. 249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, 1



Цель работы – исследование зависимости показаний измерительных каналов секторной системы контроля герметичности оболочек твэлов (ССКГО) реактора БН-600 от эксплуатационных параметров и разработка регрессионной модели предсказания фоновых показаний ССКГО.

Был сформирован перечень параметров регрессионной модели определения уровня фона измерительного канала ССКГО. Наряду с мощностью реактора, температурой в блоке детектирования (БД) и временем от начала микрокампании в состав модели включалось расчетное значение температуры за пределами БД, которое пропорционально значению приращения температуры в БД.

Коэффициенты регрессионной модели определялись методом наименьших квадратов (МНК) с применением пошаговой регрессии с последовательным добавлением параметров. Критерием включения параметра в состав модели являлось уменьшение значения средней ошибки аппроксимации ϵ и нормализация распределения остатков модели. Обработка данных проводилась с использованием MS Excel, MS Access, VBA.

Результаты построения модели показали, что все параметры статистически значимы. Погрешность разработанной модели предсказания фоновых показаний ССКГО на всех участках данных одной микрокампании БН-600 не превышает 1%, что удовлетворяет исходным требованиям.

Проведенные исследования зависимости фона от эксплуатационных параметров реактора обладают практической значимостью и научной новизной – ранее подобные исследования не публиковались. По завершении испытаний разработанной модели на расширенном объеме эксплуатационных данных будет решаться вопрос о реализации методики в составе ССКГО реакторов БН-600 и БН-800.

Ключевые слова: БН-600, секторная система контроля герметичности оболочек твэлов, фоновые показания, запаздывающие нейтроны, мощность, температура, блок детектирования, регрессионная модель, средняя ошибка аппроксимации, гистограмма.

ВВЕДЕНИЕ

ССКГО реактора БН-600 по запаздывающим нейтронам [1] позволяет вести непрерывный контроль герметичности оболочек твэлов во время работы реактора на

© **О.И. Албутова, Д.А. Лукьянов, 2015**

мощности, а также определять ориентировочное местоположение дефектных твэлов по топливу тепловыделяющих сборок (ТВС) [2]. Основная задача, решаемая с помощью системы, – формирование аварийной сигнализации оперативному персоналу о необходимости снижения мощности либо остановки реактора при достижении эксплуатационного предела и предела безопасной эксплуатации по разгерметизации твэлов.

Метод контроля герметичности основан на регистрации запаздывающих нейтронов, которые испускают продукты деления – предшественники запаздывающих нейтронов, попавшие в теплоноситель через дефекты в оболочках твэлов. В качестве детекторов запаздывающих нейтронов (ДЗН) на БН-600 используются ионизационные камеры деления, которые размещаются в блоках детектирования (БД) в шахте реактора напротив входных окон шести ПТО – промежуточных теплообменников (рис. 1).

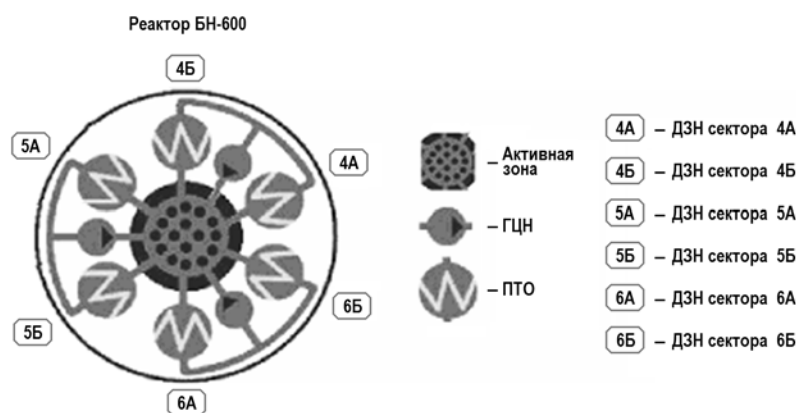


Рис. 1. Расположение блоков детектирования системы ССКГО реактора БН-600

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФОНОВЫХ ПОКАЗАНИЙ ССКГО

При отсутствии в активной зоне поврежденных твэлов показания измерительных каналов (КИ) ССКГО складываются из нескольких составляющих плотности потока нейтронов в месте расположения БД, связанных с наличием поверхностного загрязнения топлива и фотонейтронами. Но наиболее значимый вклад вносят нейтроны из активной зоны, проникающие в шахту через неоднородности в защите и попадающие в область регистрации после многократного рассеяния [3, 4].

Величина фоновых показаний КИ ССКГО неоднородна и существенно зависит не только от мощности реактора, но и от расположения блоков детектирования в шахте реактора [5]. При работе на номинальной мощности реактора фоновые показания различаются по БД в пределах двух порядков.

Также на показания КИ ССКГО влияет изменение эффективности регистрации нейтронных детекторов при изменении температуры в БД. Кроме того, наблюдается медленный эффект зависимости показаний КИ в процессе микроампации при выгорании топлива вследствие изменения профиля поля энерговыделения [6].

Превышение показаний КИ над фоном означает появление сигнала от запаздывающих нейтронов, который характеризует возникновение в активной зоне твэлов, поврежденных до прямого контакта топлива с теплоносителем. Таким образом, задача корректного определения фоновых показаний КИ ССКГО для различных эксплуатационных режимов является крайне важной. В настоящее время фоновые показания КИ по мере необходимости вводятся персоналом АЭС вручную на основе данных, полученных при эксплуатации ССКГО. Расчетное определение фоновых по-

казаний позволит избежать ошибок при вводе, более точно выделить составляющую сигнала от запаздывающих нейтронов, обеспечить более надежное прогнозирование времени достижения аварийных уставок ССКГО и точность локализации дефектных сборок [7].

РАЗРАБОТКА РЕГРЕССИОННОЙ МОДЕЛИ

Приведем результаты моделирования для одного КИ ССКГО с наибольшей величиной фоновой составляющей [5].

Зависимость фоновых показаний ССКГО от мощности является наиболее значимой и близка к линейной [2]. С учетом того, что при нулевой мощности фоновые показания ССКГО также нулевые, логично предположить зависимость

$$N_{\text{КИ}}(t_i) = k \cdot W(t_i), \quad (1)$$

где $N_{\text{КИ}}(t_i)$ – показания измерительного канала; $W(t_i)$ – мощность реактора, характеризующая влияние нейтронов активной зоны; t_i – время от начала микрокампании, сут; k – коэффициент, связывающий показания КИ с мощностью реактора.

Однако, как показали результаты обработки и анализа реакторных данных, коэффициент k не является константой, а описывается функцией, зависящей от эксплуатационных параметров – выгорания топлива (зависящего от времени t_i) и температуры в БД T_i . Кроме того, в процессе исследований при нестационарных температурных режимах наблюдалось запаздывание изменения температуры в БД по сравнению с изменением показаний каналов ССКГО. Было выдвинуто предположение о влиянии на показания ССКГО температурных перемещений корпуса реактора и конструкций шахты в области размещения БД. Для учета данного фактора в расчетную модель были введены дополнительный параметр, пропорциональный температуре в шахте реактора за пределами БД, и рассчитываемые на основе закона охлаждения Ньютона как приращения температуры в БД величины $dT(t_i) = T(t_i) - T(t_{i-1})$.

Для выбранных параметров была построена регрессионная модель, позволяющая определить коэффициент k :

$$k = k_1 \cdot t_i^2 + k_2 \cdot t_i + k_3 \cdot T(t_i) + k_4 \cdot dT(t_i) + k_5. \quad (2)$$

Определение коэффициентов k_i регрессионной модели (2) проводилось методом наименьших квадратов (МНК) с применением пошаговой регрессии с последовательным добавлением параметров. Главным критерием при построении модели являлось пошаговое уменьшение значения средней ошибки аппроксимации e [7] и нормализация распределения остатков модели, что свидетельствует о том, что рассматриваемый параметр действительно улучшает качество модели.

При построении модели сначала проводился последовательный учет параметров, характеризующих влияние эффекта выгорания топлива, и затем учет температурной зависимости показаний КИ ССКГО. Результаты построения модели приведены в табл. 1, из которой видно, что все параметры статистически значимы.

После определения коэффициентов модели (2) на основе (1) была получена модель определения фоновых показаний исследуемого КИ ССКГО:

$$N_{\text{КИ}} = W(t_i) \cdot (3.7810^{-5} \cdot t_i^2 - 0.002 \cdot t_i - 0.1 \cdot T(t_i) - 0.14 \cdot dT(t_i) + 87.75). \quad (3)$$

Как и ожидалось, величина фона растет с увеличением мощности и падает с ростом температуры в блоке детектирования. Рост фона от времени работы реактора определяется соответствующим изменением профиля поля в активной зоне реактора.

Таблица 1

Результаты пошагового построения регрессионной модели

Порядок учета параметров	Параметр модели	Характеристика параметра	Средняя ошибка аппроксимации при учете параметра
1	Время от начала микрокампании t , сут	Учет эффекта выгорания топлива	$\varepsilon_1 = 0,36\%$
2	Квадрат времени от начала микрокампании t^2 , сут ²	Учет эффекта выгорания топлива	$\varepsilon_2 = 0,31\%$
3	Температура в блоке детектирования $T(t)$, °C	Учет температурной зависимости показаний	$\varepsilon_3 = 0,226\%$
4	Приращение температуры в блоке детектирования $dT(t)$, °C	Учет температурной зависимости показаний	$\varepsilon_4 = 0,223\%$

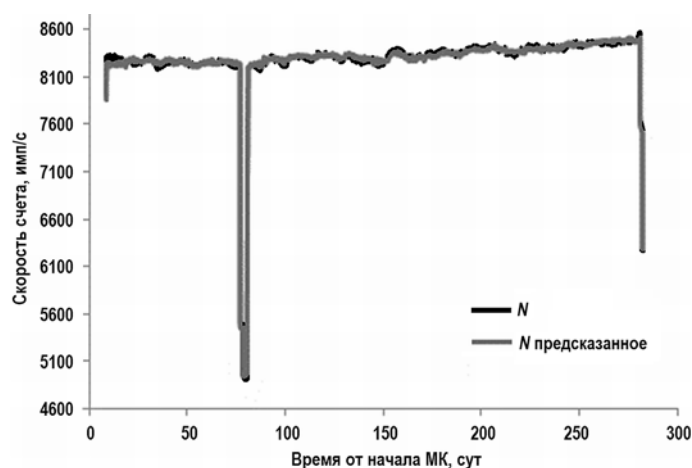


Рис. 2. Исходные и предсказанные показания КИ

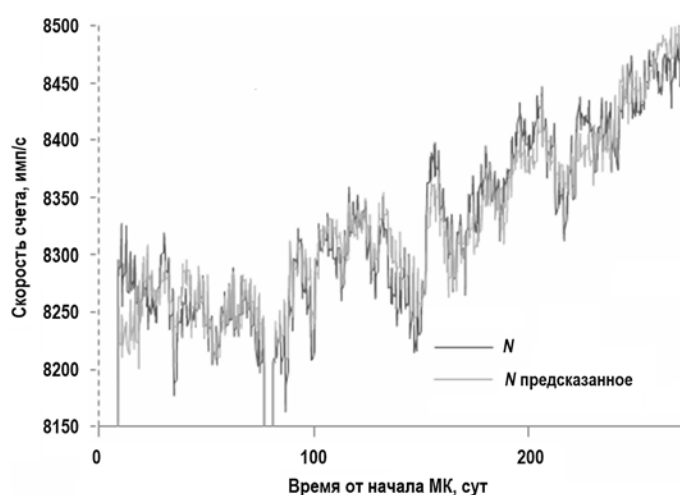


Рис. 3. Исходные и предсказанные показания КИ в увеличенном масштабе

На рисунках 2, 3 представлены исходное и предсказанное значения КИ. Вид-

но, что качество предсказания достаточно высокое. Необходимо отметить, что модель (3) хорошо работает в широком диапазоне изменения мощности. На рисунке 4 приводится гистограмма регрессионных остатков, распределение которых близко к нормальному.

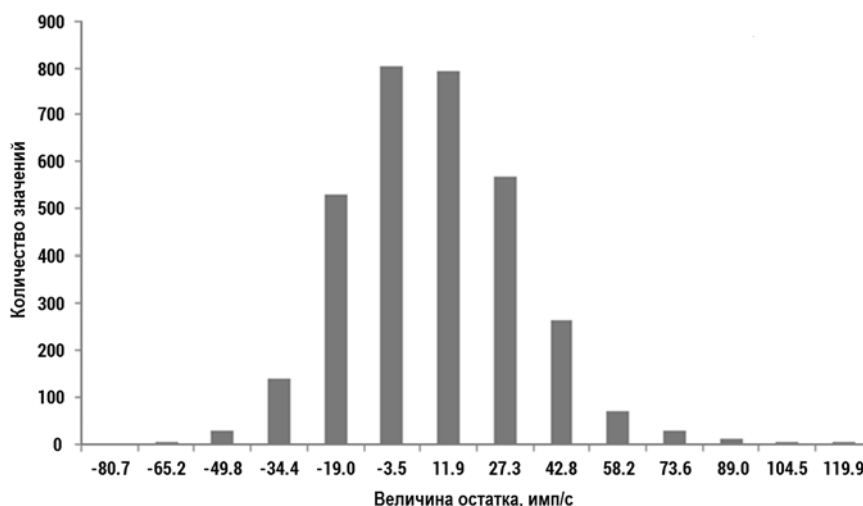


Рис. 4. Гистограмма остатков регрессионной модели ($N - N_{\text{предсказанное}}$)

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРЕДСКАЗАНИЯ ФОНОВОГО СИГНАЛА

Средняя ошибка аппроксимации разработанных на основе данного подхода моделей предсказания усредненных за один час показаний различных КИ ССКГО реактора БН-600 в зависимости от мощности реактора, времени от начала микрокампании, температуры в БД и расчетного параметра, пропорционального температуре за пределами БД, на всех участках данных одной микрокампании реактора БН-600 не превышает 1%, что в полной мере удовлетворяет исходным требованиям.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам исследований показана возможность определения фоновых показаний КИ ССКГО для различных эксплуатационных режимов в автоматическом режиме с достаточно высокой точностью, что позволит

- более точно определять превышение показаний КИ над фоном, дающее возможность обнаружения на более ранней стадии сигнала от запаздывающих нейтронов и появления в активной зоне твэлов, поврежденных до прямого контакта топлива с теплоносителем;
- существенно увеличить точность локализации ТВС с негерметичными твэлами;
- избежать ошибок при ручном вводе текущих фоновых значений оператором.

По завершении испытаний разработанной модели на расширенном объеме эксплуатационных данных будет решаться вопрос о реализации методики в составе программного обеспечения ССКГО реакторов БН-600 и БН-800.

Литература

1. Дворников П.А., Ковтун С.Н., Лукьянов Д.А., Скоморохов А.О., Жилкин А.С., Югов С.И. Комплексный анализ данных в системе контроля герметичности оболочек твэлов реактора БН-800. / XII Международная конференция «Безопасность АЭС и подготовка кадров». Тезисы докладов. Обнинск. ИАТЭ НИЯУ МИФИ, 2011. -89 с.

2. Дворников П.А., Ковтун С.Н., Лукьянов Д.А., Шутов С.С., Жилкин А.С. Методы локализации дефектных ТВС в реакторе МБИР. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2013. – № 3. – С. 24–33.

3. Ломакин С.С. Ядерно-физические методы диагностики и контроля активных зон реакторов АЭС. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 119 с.

4. Лопатин Ю.В. Автоматизированная система контроля технического состояния твэлов реакторов типа БН. Атомные электростанции. Вып. 7. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – С.62–70.

5. Дворников П.А., Ковтун С.Н., Лукьянов Д.А., Шутов С.С., Жилкин А.С. Программа локализации ТВС с негерметичными по топливу твэлами в реакторе МБИР по показаниям датчиков запаздывающих нейтронов. / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014613853 от 09 апреля 2014 г.

6. Баклушин Р.П. Технология энергоблоков АЭС с натриевым теплоносителем. (История развития и опыт эксплуатации). – Обнинск. ОНТИ ГНЦ РФ-ФЭИ, 2012. – 300 с.

7. Петрунин Ю.Ю. Информационные технологии анализа данных. Data analysis: учебное пособие. – 2-е издание. – М.: КДУ, 2010. – 292 с.

Поступила в редакцию 19.01.2015

Авторы

Албутова Ольга Игоревна, инженер

E-mail: oalbutova@ippe.ru

Лукьянов Дмитрий Александрович, ведущий научный сотрудник,

E-mail: dlukyanov@ippe.ru

UDC 621.039

INVESTIGATION OF THE DEPENDENCE TESTIMONY SECTOR CONTROL SYSTEM LEAK FUEL CLADDING BN-600 REACTOR ON THE OPERATIONAL PARAMETERS

Albutova O.I., Lukyanov D.A.

JSC «SSC RF-IPPE» n.a. A.I. Lejpunskij.

1, Bondarenko sq., Obninsk, Kaluga reg., 249033 Russia

ABSTRACT

The problem of determining the background of indications of measuring channels of the sector control tightness claddings (SSKGO) (evidence in the absence of the defect), which significantly depend on the location of the control points and the operational parameters of the reactor is relevant for fast reactors. The ability to predict the estimated background opens up prospects for further development of the sector CLC, improve its technical and metrological characteristics.

The dependence of readings SSKGO BN-600 on the operational parameters and the development of a regression model predicting SSKGO background readings.

Process performance. 1) Formation of the list of parameters of the regression model for determining background level measuring channel SSKGO. Along with the power of the reactor, the temperature in the detection unit (DB) and the time to start mikrokampanii in the model included the estimated value of the temperature outside of the database, which is proportional to the temperature increment in the database. 2) Determination of the coefficients of the regression model was performed by least squares (OLS) using stepwise regression with the sequential addition of para-meters. The criterion for inclusion of a parameter in the model was to reduce the value of the average approximation error ϵ and normalization of residual distribution model. Data processing was carried out using MS

Excel, MS Access, VBA.

Modeling results show that all parameters are statistically significant. In the prediction error of the model developed SSKGO background readings in all areas given one-governmental mikrokampanii reactor BN-600 is less than 1%, which meets the original requirements.

The research background depending on the operational parameters of the reactor have scientific novelty – earlier similar studies have not been published, and practical significance. Upon completion of testing the model developed at enhancing the operational data, will decide on the implementation of the technique as part of SSKGO reactors of the BN-600 and BN-800.

Key words: BN-600, sectoral monitoring system leak fuel cladding, background readings, delayed neutrons, capacity, temperature, detection unit, regression model, an average approximation error, bar chart.

REFERENCES

1. Dvornikov P.A., Kovtun S.N., Lukyanov D.A., Skomorokhov A.O., Zhilkin A.S., Yugov S.I. Comprehensive analysis of the data in the system of fuel cladding leak test of the reactor BN-800. *XII Mezhdunarodnajakonferencija «Bezopasnost' AJeSipodgotovkakadrov». Tezisy dokladov.* [XII Conference «NPP Safety and Training». Abstracts]. Obninsk, 2011. INPENRNU "MEPhI», p. 89 (in Russian).
2. Dvornikov P.A., Kovtun S.N., Lukyanov D.A., Shutov S.S., Zhilkin A.S. Methods of localization of defective fuel assemblies in the reactor MBIR. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika.* 2013, no. 3, pp. 24-33 (in Russian).
3. Dvornikov P.A., Kovtun S.N., Lukyanov D.A., Shutov S.S., Zhilkin A.S. The program localization FA with fuel leaking fuel rods in the reactor MBIR on the testimony of the sensor-delayed neutrons. Certificate of state registration of the computer Number 2014613853 on April 9, 2014 (in Russian).
4. Baklushin R.P. Technology NPP with sodium coolant. (History of the development and operating experience). –Obninsk, *ONTIGNCRF-FEI Publ.* 2012. 300 p. (in Russian).
5. Petrunin J.J. Information technology analysis. Data analysis: tutorial. 2-nd edition. Moscow. SAM Publ., 2010. 292 p. (in Russian).
6. Lomakin S.S. Nuclear-physical methods of diagnostics and monitoring nuclear reactor cores. Moscow. Energoatomizdat Publ., 1986. 119 p. (in Russian).
7. Lopatin Y.V. The automated system of technical inspection of fuel elements reactors BN-type. Nuclear power plants. Moscow. Energoatomizdat Publ., 1984, no.7, pp. 62-70 (in Russian).

Authors

Albutova Ol'ga Igorevna, Engineer

E-mail: oalbutova@ippe.ru

Lukyanov Dmitrij Aleksandrovich, Leading Researcher

E-mail: dlukyanov@ippe.ru