

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГРАФА ДЛЯ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ О СОСТОЯНИИ АКТИВНОЙ ЗОНЫ РЕАКТОРА ВВЭР-1000

Р.Р. Алыев, С.Т. Лескин

Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ, г. Обнинск, Россия



Представлен метод, позволяющий осуществлять контроль за состоянием активной зоны используя только по показаниям датчиков системы внутриреакторного контроля (СВРК); использовать для контроля и детектор прямого заряда (ДПЗ), и термопары (ТП) СВРК, исключить ошибку в определении показаний ТП, связанную с ПЭЛ-эффектом; получать оперативному персоналу информацию о состоянии активной зоны в наглядном виде. Метод использовался для анализа работы активной зоны блока № 2 Калининской АС. Подтверждено адекватное физическому процессу описание состояния активной зоны.

Ключевые слова: состояние активной зоны, система внутриреакторного контроля, детектор прямого заряда, термопара, Калининская АС.

Key words: core conditions, in-core monitoring system, power density detectors, PDD, thermocouple, TC, Kalinin NPP.

ПРЕДОСТАВЛЕНИЕ ИНФОРМАЦИИ ОПЕРАТИВНОМУ ПЕРСОНАЛУ О СОСТОЯНИИ АКТИВНОЙ ЗОНЫ РЕАКТОРА ВВЭР-1000

В процессе оперативного анализа состояния оборудования АЭС, в частности, активной зоны (АЗ) по данным СВРК, возникает необходимость наглядного представления общих и частных закономерностей этого состояния для принятия решений по изменению условий эксплуатации.

Для ВВЭР-1000 в состав СВРК входит контрольно-измерительная система, которая состоит из 64 каналов измерения энерговыделения, в каждом из которых 7 ДПЗ, расположенных по высоте активной зоны, и 95 термопар над тепловыделяющими сборками (ТВС) [1].

Информация предоставляется оперативному персоналу в виде отдельных картограмм активной зоны с указанием уровня энерговыделения в каждой из 163 ТВС и картограмм температур теплоносителя на выходе из 95-ти кассет (рис. 1, 2).

Отбраковка данных в системе осуществляется по признакам выхода

- аналоговых сигналов за допустимые границы;
- физических величин за допустимые границы значений и скоростей изменения.

Уровень энерговыделения в каждой из кассет определяется после восстановления объемного поля энерговыделения программным обеспечением СВРК (ПО

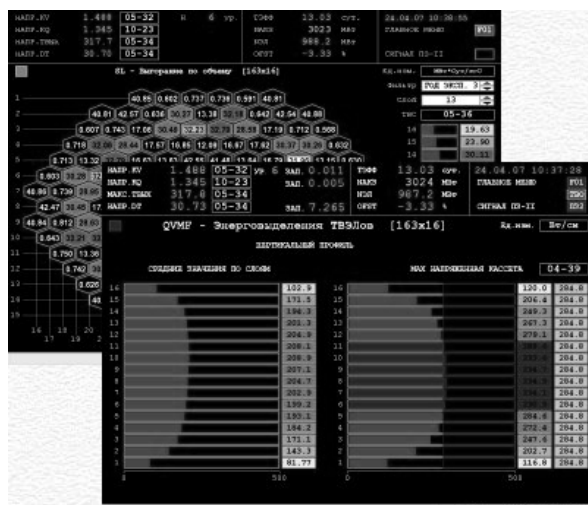


Рис. 1. Представление информации об уровне энерговыделения в ТВС

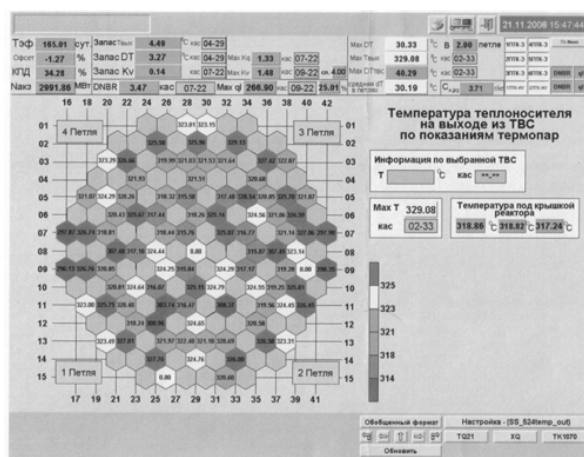


Рис. 2. Картограмма температур теплоносителя на выходе из кассет

СВРК) по показаниям каналов нейтронных измерений (КНИ), которое выполняется после отбраковки данных.

Периодическая проверка и анализ работоспособности СВРК проводится группой специалистов, сопровождающих ее эксплуатацию.

Количество и качество информации, предоставляемой оперативному персоналу, зависит от многих факторов, среди которых не последняя роль принадлежит субъективным оценкам. Для решения практических задач, например, определить, являются ли отклонения в показаниях измерительной системы физическим процессом или вызваны погрешностями измерений, необходимо провести анализ достаточно большого количества информации; сопоставить картограммы восстановленного поля энерговыделения в активной зоне и поля температур на выходе из ТВС и еще достаточно большого количества дополнительной информации о состоянии оборудования, часто, при дефиците времени. КНИ и ТП обеспечивают контроль за энерговыделением в более чем 90% ТВС, но возможность сов-

местного анализа их показаний с помощью штатного программного обеспечения отсутствует.

Таким образом, для оперативного и более эффективного анализа состояния АЗ требуется, с одной стороны, использовать всю информацию измерительной системы, с другой стороны, эксплуатационному персоналу нужно предоставлять только часть этой информации, которая необходима ему для принятия решения, т.е. увеличить информативность представления физических процессов в АЗ.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГРАФА ДЛЯ ОПИСАНИЯ СОСТОЯНИЯ АКТИВНОЙ ЗОНЫ ПО ПОКАЗАНИЯМ СВРК

Представление состояния активной зоны минимальным остовным деревом

В рамках предложенного подхода к анализу данных СВРК представим состояние активной зоны в некоторый момент времени связным неориентированным ациклическим взвешенным графом (деревом) [2]:

$$G = (V, E, y), \quad (1)$$

где $V = \{v_i\}$, $i = 1, N$ – множество вершин (измерительных каналов); N – число вершин дерева; $E \subset V \times V$ – подмножество пар (v_i, v_j) , $v_i \in V$, $v_j \in V$ – множество ребер; y – весовая функция, ставящая в соответствие каждой паре вершин дерева некоторое число, характеризующее «близость» параметров в пространстве измерений, совокупность которых характеризует данное состояние активной зоны.

Веса ребер, соединяющих соседние вершины i и j , выбираются в соответствии с правилом

$$Y_{ij} = \min\{y_{ik}\}, \quad k = 1, N, k \neq i, \quad (2)$$

где y_{ik} – значения весовой функции для пары вершин i, k ; N – число измерительных каналов (КНИ и термпар). Тогда граф G с учетом (2), согласно определению, является минимальным остовным деревом G^0 , однозначно представляющим состояние активной зоны.

Выбор весовой функции

Весовая функция ставит в соответствие каждой паре данных x_i, x_j (x_i, x_j – данные измерительной системы i -го и j -го измерительных каналов, некоторое число Y_{ij} , характеризующее степень «близости» между ними на множестве измерений. Весовая функция должна удовлетворять следующим формальным требованиям:

$$Y_{ij} > 0, Y_{ij} = Y_{ji}, Y_{ii} < Y_{ij}. \quad (3)$$

Из физических соображений в соответствии с правилом (2) в качестве «веса» должны выбираться близкие по значению данные каналов измерительной системы, геометрически близко расположенные в активной зоне.

В процессе анализа различных мер близости [3] наиболее приемлемой в смысле интерпретации результатов оказалась мера вида

$$Y_{ij} = \frac{1 + |x_i - x_j|}{2 + \cos \varphi_{ij}} \cdot R_{ij}, \quad (4)$$

где x_i, x_j нормированные показания измерительных каналов i и j соответственно; φ_{ij} – угол между векторами, соединяющими центр активной зоны с i -м и j -м каналами измерения; R_{ij} – расстояние между измерительными каналами i и j .

Показания измерительной системы СВРК нормировали следующим образом:

• энерговыделение

$$\hat{q}_j = \frac{q_j - \bar{q}}{q}, \quad j = \overline{1 \dots N_q}, \quad (5)$$

где N_q – количество каналов нейтронных измерений (КНИ); Q_j – суммарное измеренное энерговыделение в j -ом КНИ;

$$\bar{q} = \frac{1}{N_q} \sum_{j=1}^{N_q} q_j \quad (6)$$

– среднее значение суммарного энерговыделения в активной зоне;

$$q = \frac{1}{N_q} \sqrt{\sum_{j=1}^{N_q} (q_j - \bar{q})^2} \quad (7)$$

– средний радиус множества значений суммарного энерговыделения;

• температурный контроль

$$t_j = \frac{T_j - \bar{T}}{t}, \quad j = \overline{1 \dots N_t}, \quad (8)$$

где N_t – количество каналов температурного контроля;

$$\bar{T} = \frac{1}{N_t} \sum_{j=1}^{N_t} T_j \quad (9)$$

– среднее значение температуры над ТВС; T_j – показания j -ой термопары над ТВС;

$$t = \frac{1}{N_t} \sqrt{\sum_{j=1}^{N_t} (T_j - \bar{T})^2} \quad (10)$$

– средний радиус множества значений температур над ТВС.

Такая нормировка результатов измерений каналов температурного контроля за счет способа выбора весовой функции позволяет исключить ошибку при анализе показаний ТП, связанную с ПЭЛ-эффектом. Этот эффект заключается в занижении показаний ТП из-за подмешивания в головке ТВС относительно холодного теплоносителя, который проходит через направляющие каналы ОР СУЗ.

Контроль за состоянием активной зоны

Описания (1), (2) используются для решения задачи контроля изменения состояния активной зоны реактора ВВЭР-1000 в процессе эксплуатации. После отбраковки недостоверных показаний измерительной системы строится минимальное остовное дерево (момент времени t_0), где веса ребер определяются в соответствии со значением меры близости (4) по правилу (2), которое принимается за эталон. Далее, в следующие моменты времени (t_m) или для следующих состояний активной зоны, которые для условности назовем текущими, строится дерево, изоморфное эталонному. Сравнением с эталоном находятся наиболее деформированные части графа нового состояния [4].

Для численной оценки степени деформации текущего состояния определяем следующие характеристики:

- наибольший вес ребра в данном узле эталонного дерева

$$M_i(t_0) = \max_{\substack{k=1, N_i \\ k \neq i}} \{y_{ik}^e(t_0)\}, \quad (11)$$

где N_i – число вершин, смежных с вершиной i по траектории дерева; $M_i(t_m)$ – образ наибольшего веса ребра по узлу эталона на дереве текущего состояния, представляющий собой вес ребра, имеющего в эталонном дереве вес (11);

- усредненная (без максимальной) мера близости по узлу эталона

$$S_i(t_0) = \frac{1}{N_i - 1} \left(\sum_{k=1}^{N_i} y_{ik}(t_0) - M_i(t_0) \right); \quad (12)$$

- образ усредненной меры близости эталона на дереве текущего состояния

$$S_i(t_m) = \frac{1}{N_i - 1} \left(\sum_{k=1}^{N_i} y_{ik}(t_m) - M_i(t_m) \right); \quad (13)$$

- узловая неравномерность (рассчитывается для эталонного и текущего состояний)

$$\xi(\tau) = \frac{M_i(\tau)}{S_i(\tau)}, \quad \tau = t_0, t_m. \quad (14)$$

После того как найдены характеристики (11)–(14), для каждого узла определяем деформацию:

$$R_i = \frac{\xi_i(t_m)}{\xi_i(t_0)}. \quad (15)$$

Интерес представляют те узлы, деформация R_i которых превышает заранее заданную величину, определяемую по опыту эксплуатации активной зоны. Для описания состояния вводится массив двухкомпонентных векторов. Первой компонентой является деформация узла, а второй – разность нормированных показаний измерительного канала для текущего и эталонного состояний:

$$\Delta_i = \{R_i, (X_i(t_m) - X_i(t_0))\}, i = 1 \dots N, \quad (16)$$

Первая компонента векторов R_i (15) определяет деформацию поля энерговыделения, а вторая – изменение параметров в соответствующих измерительных каналах.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

В качестве примера работы алгоритма рассмотрены несколько состояний активной зоны блока №2 Калининской АС во время 20-й топливной кампании (2007–2008 гг.).

На рисунках 3 и 4 показано нормальное состояние активной зоны.

Массив двухкомпонентных векторов (рис. 3) образует общий класс, в котором отклонения от средней величины носят статистический характер. Анализ картограммы активной зоны показал (рис.4) отсутствие аномалий в ее состоянии и оно было принято за эталон.

На рисунках 5, 6 показано состояние активной зоны при падении органа регулирования системы управления и защиты (ОР СУЗ) в ТВС №153:

Обработка данных с помощью алгоритма определения изменения в состоянии активной зоны представлена на рис. 5. Показания измерительного канала в ТВС №153 резко отличаются от остальных. В ТВС №153 расположен упавший ОР СУЗ.

Одновременно определилось состояние ТВС 133, 143, 144, 151, 152, 154, 155, 160, 161 как отдельный класс 2, которое обусловлено возмущением энерговыделения в кассетах, связанное с падением ОР СУЗ. Данные обработки представлены на картограмме АЗ (рис. 6).

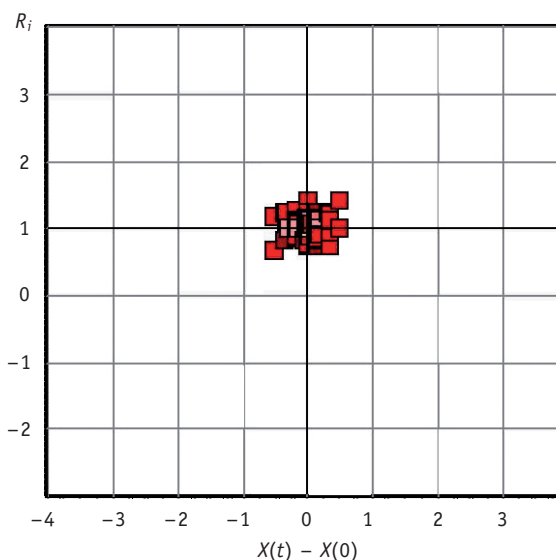


Рис. 3. Представление нормального состояния активной зоны массивом двухкомпонентных векторов

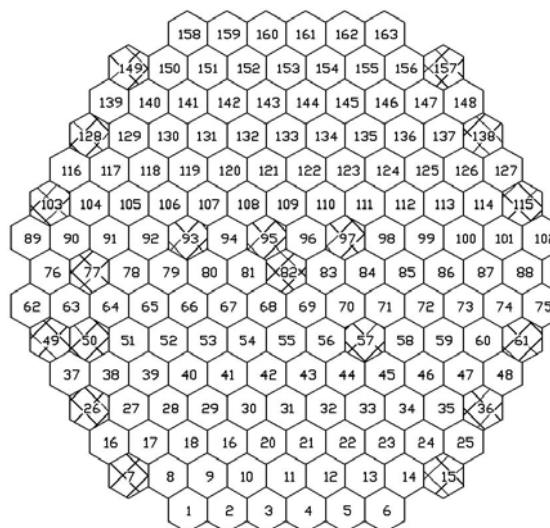


Рис. 4. Картограмма активной зоны:

1 – ТВС в нормальном состоянии;

2 – ТВС без средств контроля

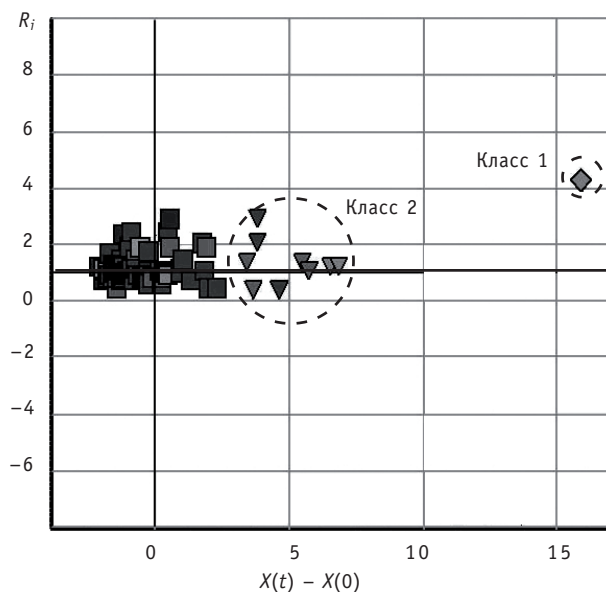


Рис. 5. Представление состояния активной зоны при падении ОР СУЗ массивом двухкомпонентных векторов

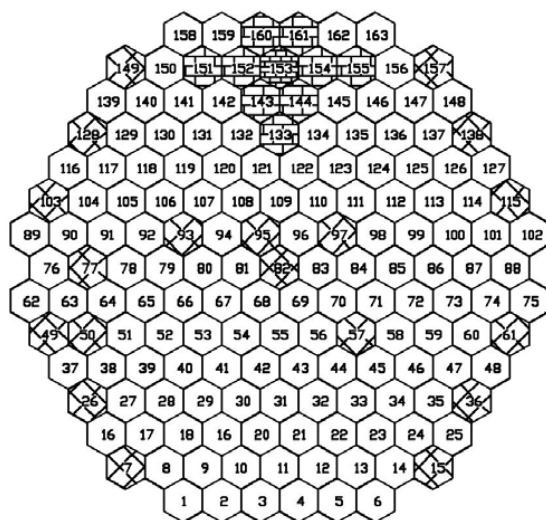


Рис. 6. Картограмма активной зоны:

- 1 – ТВС в нормальном состоянии;
- 82 – ТВС без средств контроля;
- 153 – ТВС с пониженным относительным энерговыделением

по отношению к эталонному состоянию. Группа УПЗ вносит самое большое возмущение в поле энерговыделения активной зоны. ТВС под номерами 52, 58, 133 с ОР этой группы показаны на рис. 8.

Второй подкласс – это измерительные каналы в ТВС с ОР СУЗ РОМ (рис. 7) Их показания также характеризуются высокой степенью деформации и пониженным уровнем относительного энерговыделения по отношению к эталонному состоя-

нию. На рисунках 7, 8 показано состояние активной зоны при срабатывании ускоренной предупредительной защиты (УПЗ).

В результате срабатывания УПЗ мощность реакторной установки (РУ) и активной зоны снижается до ~50% от номинальной. ОР СУЗ, выбранные в группу УПЗ по результатам расчета нейтронно-физических характеристик (НФХ) активной зоны для текущей кампании, погружаются в активную зону за время 1,2 – 4 с. Для данной кампании – это ОР СУЗ в ячейках 52, 58, 82, 133 (рис. 8). Дополнительно к УПЗ РУ разгружается аппаратурой разгрузки и ограничения мощности (РОМ) до уровня, соответствующего текущему составу работающего оборудования РУ. РОМ погружает в активную зону с рабочей скоростью (2 см/с) ОР СУЗ 10, 9 и 8 групп. Движение начинают ОР СУЗ группы 10, следующая группа начинает движение после того, как предыдущая пройдет половину высоты активной зоны.

Обработка показала, что в рассматриваемом состоянии (рис. 7) общий класс показаний измерительных каналов СВРК разделяется на несколько подклассов.

Первый подкласс – это измерительные каналы в ТВС с ОР СУЗ группы УПЗ. Они характеризуются высокой степенью деформации и пониженным уровнем относительного энер-

нию. Эти кассеты расположены в «центральной» части активной зоны, и снижение энерговыделения в них обусловлено движением 10 группы ОР (ТВС 41, 44, 79, 85, 120, 123 – рис. 8).

Кроме этого общий класс измерительных каналов разделяется на два подкласса (рис. 7) с повышенным (слева от оси ординат) и пониженным (справа от оси ординат) уровнем относительного энерговыделения. Эти измерительные каналы характеризуются относительно невысокой степенью деформации по отношению к эталонному состоянию. Такое разделение обусловлено перераспределением потока нейтронов в активной зоне после действия УПЗ и РОМ, вытеснением потока нейтронов из центра активной зоны, где снижается относительное энерговыделение, на периферию, где относительное энерговыделение растет (рис. 8).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленный метод контроля состояния активной зоны реакторов ВВЭР-1000 позволяет:

- осуществлять контроль при использовании только показания датчиков СВРК;
- одновременно использовать для контроля ДПЗ и ТП СВРК;
- исключить ошибку при анализе показаний ТП, связанную с ПЭЛ-эффектом;
- предоставлять оперативному персоналу информацию о состоянии активной зоны в наглядном виде.

Дальнейшее развитие представленного метода – применение алгоритмов нейронных сетей для идентификации процессов, происходящих с реакторной установкой, по показаниям СВРК.

Литература

1. Системы внутриреакторного контроля АЭС с реакторами ВВЭР/Под ред. Г.Л.Левина. – М.: Энергоатомиздат, 1987.

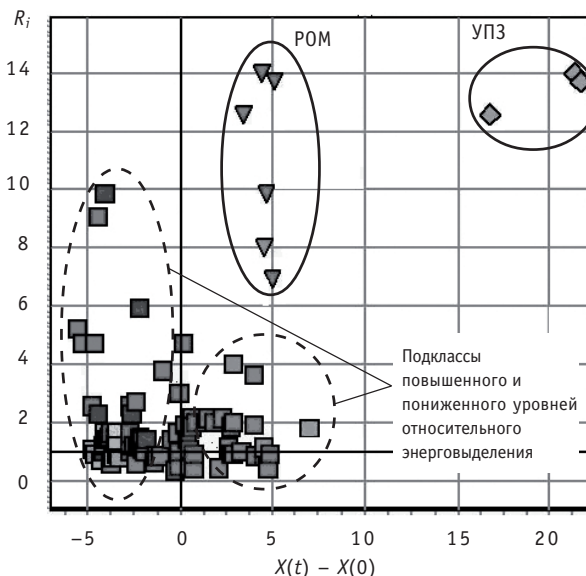


Рис. 7. Представление состояния активной зоны при срабатывании УПЗ массивом двухкомпонентных векторов

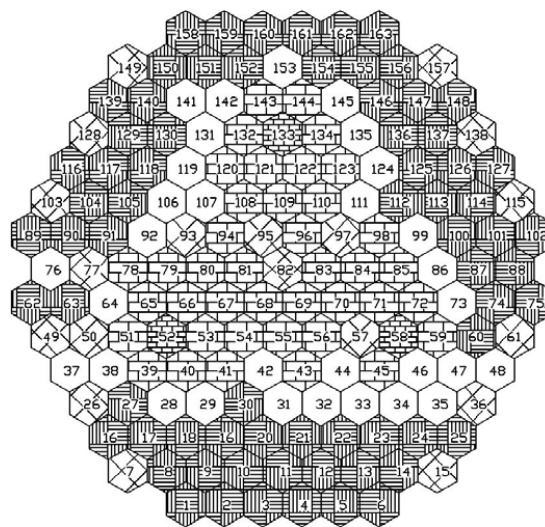


Рис. 8. Картограмма активной зоны:

- 1 – ТВС в нормальном состоянии;
- 2 – ТВС без средств контроля;
- 3 – ТВС соответственно с пониженным и повышенным относительным энерговыделением

2. Рейнгольд Э., Нивергельт Ю., Део Н. Комбинаторные алгоритмы. Теория и практика. - М.: Мир, 1980.

3. Лескин С.Т. Алгоритмы классификаций для анализа состояний активной зоны по данным измерительной системы внутриреакторного контроля//Известия вузов. Ядерная энергетика. – 1996. – № 4. – С. 20-26.

4. Лескин С.Т., Жидков С.В. Представление состояния активной зоны ВВЭР 1000 минимальным связным графом//Известия вузов. Ядерная энергетика. – 1997. – № 4. – С. 9-14.

Поступила в редакцию 21.06.2010

presence of the «small» trap resulted in the evaluation of the neutron flux density, maximal coefficients of heat rate non-uniformity, reactivity and duration of the SM run. The proposed arrangement has been implemented and materials have been irradiated in the «small» trap for the last 1.5 years of the SM operation.

УДК 621.039.56

Change of the SM Reactor Core Characteristics under the Variation of the Control Rods Arrangement \ A.V. Klinov, V.A. Starkov, Yu.B. Chertkov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 10 pages, 1 table, 6 illustrations. – References, 6 titles.

The results of neutron-physical calculations of the SM reactor characteristics under various control rods arrangement are presented. Two most intensive reactor campaigns were considered to obtain the dependence of the non-uniformity coefficient of the heat rate distribution over the FA cross-section as well as thermal flux density on the fuel rod surface and thermal neutron flux density vs. the mutual arrangement of the central shim rod (CSR) and periphery shim rods (SR). The dependence of fluence and thermal flux density on the sequence of the control rods removal has been studied as well.

УДК 621.039.517

Change of the Heat Rate Distribution in the SM Reactor Core during its Refueling and Campaigns \ A.V. Klinov, V.V. Pimenov, V.A. Starkov, Yu.B. Chertkov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 9 pages, 3 tables, 5 illustrations. – References, 4 titles.

The results are presented of neutron-physical calculations of the SM reactor campaigns performed during the reactor operation in 2000-2010. With the account of fuel burnup in the fuel rods and arrangement of the control rods, the heat rate distribution has been defined as well as the maximal thermal flux density values. The mechanisms of heat rate distribution during the reactor refueling and campaigns were examined, the control rods being removed according to the set procedure. A methodical approach to the evaluation of the core hydroprofiling has been proposed.

УДК 621.039.51

Graph Representation for VVER-1000 Core Conditions \ R.R. Alyev, S.T. Leskin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 8 pages, 8 illustrations. – References, 4 titles.

A method is presented which makes it possible to control core conditions is based on in-core monitoring data handling (power density detectors (PDD) and thermocouples (TC)). To control core conditions the method also enables to use PDD and TC together and to represent output in well-behaved view. The method is used for analyzing in-core monitoring data at Kalinin NPP. Adequate mapping of core conditions has been verified.

УДК 621.039.58

Neural Network Models for signal filtering and PWR leakage Diagnostics \ A.O. Skomorokhov, A.A. Kudryev, S.A. Morozov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 9 pages, 2 tables. – References, 7 titles.

The article is devoted to the diagnosis of anomalous situations involving loss of coolant in the 1-st loop of PWR reactors. The results of studies carried out in implementing the system diagnosing leaks on KalNPP. Considered by multiple polynomial models for filtering acoustic signals in a system of reactor pipes leakage control, to reduce the likelihood of false alarms of the system. Proposed neural network algorithm for diagnosing the leakage.

УДК 629.039.58

LINQUAD Program Validation for Uncertainty Analysis of Transient Emergency Process Calculation Results on Nuclear Energy Installation with VVER-1000 Reactor \ M.A. Uvakin, I.G. Petkevich; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 10 pages, 1 table, 8 illustrations. – References, 7 titles.

This work deals with LINQUAD program application for uncertainty analysis of transient processes calculation by the example of international test problem with steam pipe rupture on reactor installation. Also, there is a comparing of LINQUAD method with GRS method which is widely used for similar