

О ВОЗМОЖНОСТИ ИДЕНТИФИКАЦИИ АНОМАЛИИ В СОСТОЯНИИ НАСОСОВ ВЫСОКОГО И НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИСПЫТАНИЙ НА АЭС С ВВЭР

С.Т. Лескин, В.В. Корнилова

*Обнинский государственный технический университет атомной энергетики,
г. Обнинск*



Обсуждаются вопросы применения метода главных компонент для выявления причин аномальных состояний насосов высокого и низкого давления САВБ на АЭС с ВВЭР. На основании выбранной модели преобразования пространства получены закономерности влияния информативных параметров, описывающих динамику поведения насосов, на итоговое распределение признаков в пространстве главных компонент. Выявлены параметры, обусловившие возникновение аномалий в поведении насосов. Представлены результаты обработки данных четвертого блока Балаковской АЭС.

ВВЕДЕНИЕ

Вопрос оценки насосного оборудования имеет актуальное значение на АЭС с реактором типа ВВЭР. Процент отказов насосов на ядерных установках данного типа составляет около 6% от общего числа нарушений [1]. В то же время проведение профилактических мероприятий по фактическому состоянию объекта до пяти раз снижает расходы на ремонты и ущербы от перерывов энергоснабжения [2], поэтому желательно точно знать состояние оборудования и прогнозировать его на время, необходимое на подготовку к ремонту.

Оценка состояния насосов системы аварийного ввода бора (САВБ) высокого и низкого давления на АЭС с ВВЭР имеет свои особенности, затрудняющие решение подобной задачи. Традиционно контроль состояния насосов САВБ проводится посредством периодических испытаний, в ходе которых производятся измерения ряда технологических параметров. Вывод о необходимости ремонта делается по принадлежности полученных данных установленному регламентом диапазону значений, либо насос выводится в ремонт в соответствии с планом. Таким образом, для своевременного обнаружения аномалии в состоянии насоса испытания необходимо проводить как можно чаще. Проблема заключается в том, что каждый запуск насоса приводит к уменьшению его ресурса. Фактически выход из строя насосов САВБ происходит именно вследствие испытаний.

Подобный подход к оценке состояния оборудования имеет также существенный

© С.Т. Лескин, В.В. Корнилова, 2005

недостаток: в большинстве случаев он эффективен только на конечной стадии развития аномалии, когда измеряемые параметры имеют заметные отклонения от регламентированных значений. Однако при зарождении дефекта отдельные технологические параметры уже содержат скрытую информацию о начале развития аномального процесса. Следовательно, если набор измеряемых параметров подвергнуть такому преобразованию, которое позволит выделить эту информацию и представить в явном виде ее закономерности, то можно установить наличие и оценить характер дефекта на ранней стадии его развития.

При решении задачи диагностирования состояние исследуемого объекта определяется множеством технологических параметров различной физической природы. В данном случае наиболее эффективно использование статистической модели представления измерений [3]. В качестве параметров, по которым оценивается состояние насосов, используются участки кривых, отображенных по энтропии [4].

Выбранный таким образом комплекс информативных параметров (компоненты информативного вектора), строго говоря, не является эффективным. Отдельные параметры могут быть взаимосвязанными или находиться в функциональной зависимости, что приводит к дублированию информации. Другая часть параметров имеет незначительный разброс значений и, следовательно, является «шумом», затрудняющим оценку состояния объектов. Наиболее оптимальным представлением признакового пространства, позволяющим выявить закономерности зарождения и развития аномалии, является пространство главных компонент (разложение Карунена-Лоева) [5, 6].

АЛГОРИТМ ИДЕНТИФИКАЦИИ АНОМАЛИИ

Представление k -го измерения в пространстве главных компонент имеет вид:

$$y_i^{(k)} = C_i^T X^{(k)}, \quad i = (1, N), \quad (1)$$

где N – количество главных компонент; $C_i^T = [c_i^{(1)} \dots c_i^{(M)}]$ – собственный вектор корреляционной матрицы комплекса информативных параметров, определяющий направление i -ой главной компоненты (M – количество параметров); $X^{(k)} = [x_1^{(k)} \dots x_M^{(k)}]^T$ – вектор информативных параметров k -го измерения; $Y^{(k)} = [y_1^{(k)} \dots y_N^{(k)}]$ – вектор главных компонент k -го измерения.

Эффективность представления информации в пространстве главных компонент для i -ой компоненты вектора $Y^{(k)}$ определяется соответствующим собственным значением. Если собственные значения упорядочены в порядке убывания:

$$\lambda_1 > \lambda_2 > \dots > \lambda_N > 0, \quad (2)$$

то собственные векторы должны быть ранжированы соответствующим образом.

При соблюдении условия (2) первые две главные компоненты в большинстве случаев содержат около 90% информации. Таким образом, если разложение Карунена-Лоева позволит выделить в пространстве, образованном этими компонентами, некоторый класс состояний, отличных от состояний большинства объектов, то наиболее вероятно предположить, что выделенные состояния являются аномальными.

Для идентификации особенностей состояния оборудования необходимо проанализировать факторы, влияющие на разброс измерений в пространстве главных компонент.

Введем понятие весового вектора информативного параметра:

$$C^{(j)} = [c_1^{(j)} \dots c_N^{(j)}], \quad j = (1, M), \quad (3)$$

компонентами которого являются элементы матрицы преобразования (1).

В явном виде связь между рассматриваемыми пространствами можно описать положением весов информативных параметров в новой системе координат. Чем ближе ориентирован весовой вектор информативного параметра к направлению i -ой главной компоненты, тем в большей степени положение i -ой главной компоненты обусловлено разбросом измерений по данному параметру, а в предельном случае, когда компонента совпадает с весовым вектором параметра, полностью определяется этим разбросом.

Таким образом, поставленную задачу можно разделить на два этапа: оценка влияния информативных параметров на расположение главных компонент и определение вклада каждой компоненты в разброс измерений.

Для решения обозначенной задачи воспользуемся теорией нечетких множеств [7]. Представим факторы, влияющие на разброс измерений в пространстве главных компонент, в виде следующих совокупностей:

$\mathbf{X} = \{X_1, \dots, X_M\}$ – множество информативных параметров;

$\mathbf{C} = \{C_1, \dots, C_N\}$ – множество базисных векторов преобразования (главных компонент);

$\tilde{\mathbf{Y}} = \{\tilde{Y}^{(1)}, \dots, \tilde{Y}^{(n)}\}$ – подмножество векторов (измерений), которые выделены как аномальные в пространстве главных компонент (n – количество аномальных состояний насосов), $\tilde{\mathbf{Y}} \subset \mathbf{Y}$, где $\mathbf{Y} = \{Y^{(1)}, \dots, Y^{(n)}\}$ – множество измерений в пространстве главных компонент.

Для каждой компоненты $C_i \in \mathbf{C}$ и каждого параметра $X_j \in \mathbf{X}$ можно определить нечеткое отношение R_1 : «параметр X_j влияет на ориентацию компоненты C_i относительно исходной системы координат». Исходя из условий задачи, функция принадлежности для такого нечеткого отношения определяется следующим образом:

$$\mu_{R_1}(X_j, C_i) = c_i^{(j)}. \quad (4)$$

С другой стороны, для каждой компоненты $C_i \in \mathbf{C}$ и каждого измерения $\tilde{Y}^{(k)} \in \tilde{\mathbf{Y}}$ можно задать нечеткое отношение R_2 : «компонента C_i определяет разброс измерений $\tilde{Y}^{(k)}$ в пространстве главных компонент». В качестве функции принадлежности для нечеткого отношения R_2 выберем величину:

$$\mu_{R_2}(C_i, \tilde{Y}^{(k)}) = \frac{\tilde{Y}_i^{(k)}}{\sqrt{\sum_{i=1}^N [\tilde{Y}_i^{(k)}]^2}}. \quad (5)$$

Для определения нечеткого отношения $R_1 \cdot R_2$ воспользуемся принципом композиции двух отношений [8]:

$$\mu_{R_1 \cdot R_2}(X_j, \tilde{Y}^{(k)}) = \max_c [\min(\mu_{R_1}(X_j, C_i), \mu_{R_2}(C_i, \tilde{Y}^{(k)}))], \quad (6)$$

где $\mu_{R_1 \cdot R_2}(X_j, \tilde{Y}^{(k)})$ характеризует влияние параметра X_j на разброс измерений $\tilde{Y}^{(k)}$ в пространстве главных компонент.

Таким образом, на множестве $\tilde{\mathbf{Y}}$ можно определить M нечетких множеств

$A_j = \{\tilde{Y}^{(k)}, \mu(X_j, \tilde{Y}^{(k)})\}$, каждое из которых характеризует влияние j -го информативного параметра на принадлежность измерений $\{\tilde{Y}^{(k)}\}$ классу состояний, выделенных как аномальные.

Пусть m – количество технологических параметров. Тогда множество X можно разбить на m взаимно непересекающихся подмножеств $\{X_{j \in t}\}$, $t = (1, m)$, где $X_{j \in t}$ – информативный параметр, характеризующий разбросы измерений t -го технологического параметра. Соответственно нечеткое множество:

$$B_t = A_{j \in t}^{(1)} \cap A_{j \in t}^{(2)} \cap \dots \quad (8)$$

будет описывать влияние t -го технологического параметра на разброс измерений в пространстве главных компонент в области аномалии.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Для преобразования в пространство главных компонент использовались результаты испытаний насосов высокого и низкого давления Балаковской АЭС. Технологические параметры, измеряемые в процессе периодических испытаний насосов, а также количество описывающих их информативных параметров [4] представлены в табл. 1.

Таблица 1

Обозначение технологического параметра	Наименование технологического параметра	Количество информативных параметров	
		Насосы высокого давления	Насосы низкого давления
F01	Расход	3	2
P01	Давление во всасывающем трубопроводе	3	2
P02	Давление в напорном трубопроводе	—	2
T04	Температура 1-го подшипника	—	3
T05	Температура 2-го подшипника	—	3
T06	Температура 4-го подшипника	—	3
T07	Температура 3-го подшипника	—	3
T08	Температура за гидропайтой	—	3

Анализ данных испытаний насосов высокого давления

Отображение весов информативных параметров в пространство первых двух главных компонент для насосов высокого давления представлено на рис. 1. Из рисунка видно, что разброс измерений в направлении первой главной компоненты определяет давление во всасывающем трубопроводе (параметр P01), а на разброс измерений в направлении второй главной компоненты влияет расход насоса (параметр F01).

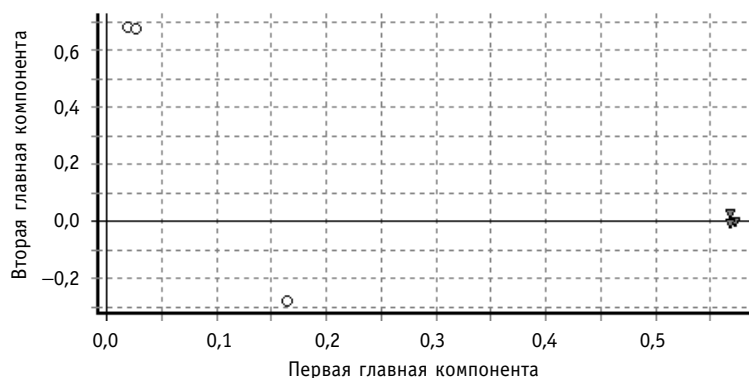


Рис. 1. Отображение весов информативных параметров в пространство первых двух главных компонент для насосов высокого давления: ○ – веса параметра F01; ▼ – веса параметра P01

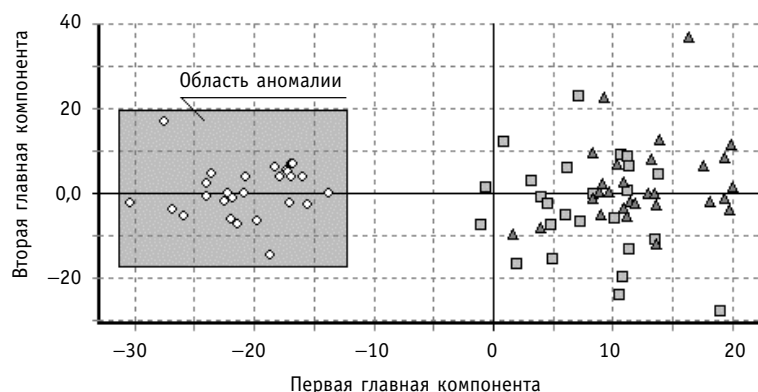


Рис. 2. Результаты испытаний насосов высокого давления в пространстве первых двух главных компонент: ■ – испытания насоса TQ14D01; ○ – испытания насоса TQ24D01; ▲ – испытания насоса TQ34D01

Результаты испытаний насосов высокого давления в пространстве первых двух главных компонент представлены на рис. 2. Обращает на себя внимание состояние насоса TQ24D01, существенно отличающееся от остальных в направлении первой главной компоненты. Сопоставление рис. 1 и 2 позволяет предположить, что признаком, определившим особенность поведения этого насоса, является параметр P01.

Это предположение подтверждают результаты вычисления функций принадлежности для нечетких множеств V_{F01} и V_{P01} . Были проведены два варианта расчета: в первом случае для вычисления функции принадлежности ограничивались рассмотрением только первых двух главных компонент, а во втором случае расчет проводился по всем главным компонентам. В итоге было получено, что для всех измерений, которые образуют область аномалии, $V_{F01} \subset V_{P01}$ для обоих вариантов расчета.

Для наглядного сравнения влияния технологических параметров на разброс измерений в области аномалии воспользуемся процентным соотношением:

$$F(t) = \frac{\sum_{k=1}^n \mu_{B_t}}{\sum_{k=1}^n \mu_{B_t}^{\max}} \cdot 100\%, \quad (9)$$

где $\mu_{B_t}^{\max}$ – функция принадлежности нечеткого множества параметра, который оказывает преобладающее влияние на разброс измерений в выделенной области (рис. 2).

Результаты расчета $F(t)$ показаны на рис. 3, из которого видно, что влияние параметра P01 на разброс измерений в области аномалии значительно выше, чем влияние параметра F01 для обоих случаев расчета.

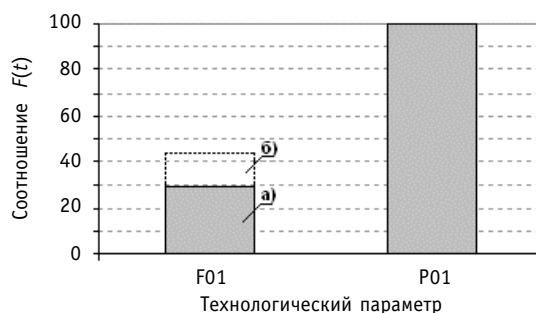


Рис. 3. Результаты расчета $F(t)$ для насосов высокого давления: а) для первых двух главных компонент; б) для всех главных компонент

раметра F01 во втором случае по сравнению с расчетом по первым двум главным компонентам незначительно и объясняется небольшим вкладом остальных главных компонент.

Таким образом, результаты расчета позволяют сделать вывод, что при оценке состояния насоса TQ24D01 в первую очередь следует обратить внимание на работоспособность датчика давления во всасывающем трубопроводе, а при его исправности провести анализ работы элементов оборудования, влияющих на гидравлические характеристики насоса.

Анализ данных испытаний насосов низкого давления

Отображение весов информативных параметров в пространство первых двух главных компонент для насосов низкого давления представлено на рис. 4. Из рисунка видно, что основной вклад в разброс измерений в направлении первой главной компоненты вносит группа параметров T04, T05, T06 и T07 (температуры подшипников), а разброс измерений в направлении второй главной компоненты обусловлен влиянием гидродинамических параметров F01, P01 и P02.

Результаты испытаний насосов низкого давления в пространстве первых двух главных компонент представлены на рис. 5. Заметно, что в состоянии насоса TQ33D01

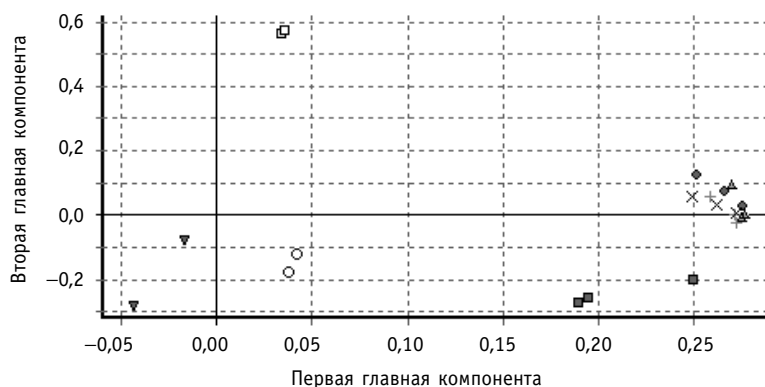


Рис. 4. Отображение весов информативных параметров в пространство первых двух главных компонент для насосов низкого давления: ○ – веса параметра F01; ▽ – веса параметра P01; □ – веса параметра P02; ▲ – веса параметра T04; ◆ – веса параметра T05; × – веса параметра T06; + – веса параметра T07; ■ – веса параметра T08

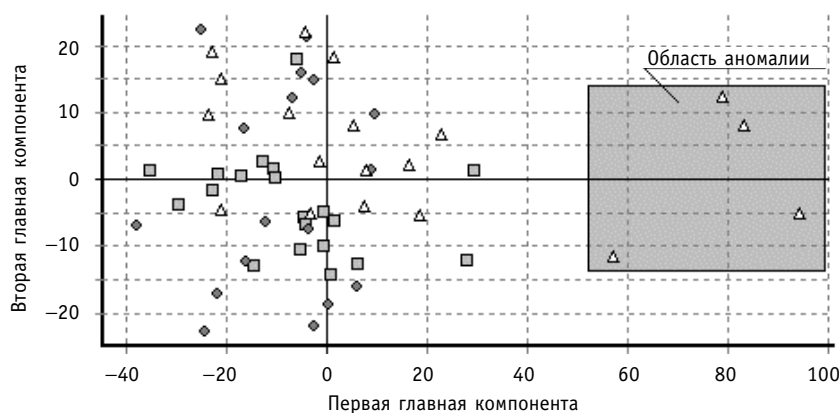


Рис. 5. Результаты испытаний насосов низкого давления в пространстве первых двух главных компонент: ■ – испытания насоса TQ13D01; ◆ – испытания насоса TQ23D01; △ – испытания насоса TQ33D01

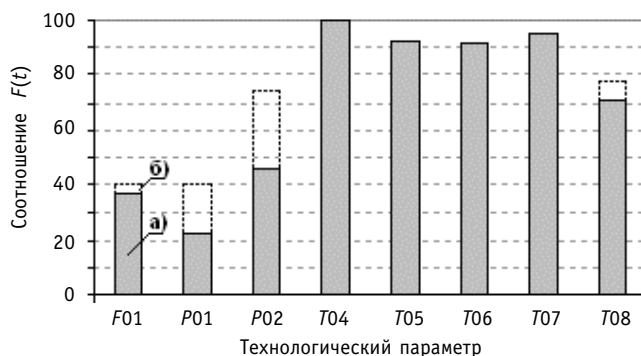


Рис. 6. Результаты расчета $F(t)$ для насосов низкого давления: а) для первых двух главных компонент; б) для всех главных компонент

имеется особенность в направлении первой главной компоненты. Сопоставив рис. 4 и 5, можно сделать предположение, что выделенные состояния насоса TQ33D01 обусловлены температурами подшипников.

Действительно, согласно результатам расчета функций принадлежности, в аномальной области преобладает влияние параметра T04 для обоих вариантов вычислений (с учетом только двух первых и всех главных компонент).

Значения величины $F(T)$ представлены на рис. 6, из которого видно, что температуры подшипников образуют тесно взаимосвязанную группу, которая оказывает определяющее влияние на разброс измерений в области аномалии. Следовательно при ревизии насоса TQ33D01, в первую очередь, необходимо обратить внимание на состояние подшипников.

ВЫВОДЫ

Разработан алгоритм диагностики состояния насосов САВБ, который позволяет распознавать аномалию в поведении насоса на ранней стадии ее развития. В основе алгоритма лежит преобразование Карунена-Лоева, которое дает возможность провести визуальный анализ разбросов измерений при минимальной ошибке представления данных в новой системе координат.

Определение технологических параметров, в которых проявляется аномалия в состоянии насосов, осуществляется с использованием теории нечетких множеств.

Результаты анализа показали:

- наличие аномалии в состоянии насоса высокого давления второго канала, связанное с работоспособностью датчика давления, либо с состоянием элементов оборудования, влияющих на гидравлические характеристики насоса;
- наличие особенности в поведении насоса низкого давления третьего канала, по всей видимости, связанное с состоянием подшипников.

Литература

1. Антонов Б.В. Итоги эксплуатации АЭС в России в 1995 г. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 1996. – № 3. – С. 4-10.
2. Копьев Ю.В. Экспресс-анализ работы АЭС России за первое полугодие 2000 г. – М.: Концерн «Росэнергоатом».
3. Лескин С.Т., Зарюгин Д.Г. Разработка алгоритмов распознавания состояния оборудования АЭС по анализу данных оперативного технологического контроля // Научные исследования в области ядерной энергетики в технических вузах России. – М.: МЭИ, 1999.
4. Лескин С.Т., Валуи В.В. Применение метода главных компонент для диагностики насосов высокого и низкого давления по результатам испытаний в процессе эксплуатации АЭС с ВВЭР // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2002. – № 4. – С. 38-45.

5. *Загоруйко Н.Г.* Методы распознавания и их применение. – Советское радио, 1972.
6. *Фукунага К.* Введение в статистическую теорию распознавания образов. – М.: Наука, 1979.
7. *Беллман Р., Заде Л.* Вопросы принятия решений в расплывчатых условиях // Вопросы анализа и процедуры принятия решений. – М.: Мир, 1976.
8. *Домарев В.В.* Безопасность информационных технологий. Системный подход. – К.: ДиаСофт, 2004.

Поступила в редакцию 26.09.2005

УДК 621.311.25: 621.039

Information Representation for In-Process Review of NPP Unit STATUS\ E.N. Alontseva, A.N. Anokhin, A.S. Stebenev, E. Marshal; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of High Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2005. – 6 pages, 2 illustrations. – References, 3 titles.

The large number of process parameters which are available for NPP Main Control Room (MCR) operators can provoke the information stress which leads to unavoidable personnel errors. To decrease a probability of information stress the principle of multilevel hierarchical representation of information is used in the good world-wide practice of modern computerized MCR design. A generalized mimic diagram (GMD) constitutes the top level of such representation. The GMD objective is to provide for MCR operators the NPP conditions in a general way as well as to display status of critical safety functions and main material and power balances. The present paper describes the approach to GMD developing in the case of RBMK-1000 power unit of Leningrad NPP.

УДК 621.311.25: 621.039

Efficiency Evaluation for Small and Medium-Sized Reactors in the Sakha Republic (Yakutia) \A.A.Andrianov, Yu.A.Korovin, E.V. Fedorova; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of High Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2005. – 11 pages, 2 tables, 17 illustrations. – References, 9 titles.

The present paper analyzes the technical and economic feasibility of small and medium-sized reactors (SMSR) deployment in remote regions of Russia using the Sakha Republic (Yakutia) as an example. The analysis made shows that the SMSR competitiveness evaluation models for particular regions with due account of their energy and economic environment hold more promise for SMSR development than aggregated models. The advantages of nuclear power as an energy source are offset by transition to the aggregated model of the energy supply of the republic. The calculations show that SMSR deployment in the republic may be economically feasible and desirable because it will result in the following: (1) a reduction in fossil fuel delivery costs; (2) a reduction in annual electricity production costs; (3) prerequisites for mining industry development; (4) improved environmental conditions in the region.

УДК 621.311.25: 621.039

Optimization of Nuclear Reactor Operation Regime in Variable Daily Loading Schedule with Accounting for Energy Utilization \A.M. Zagrebayev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of High Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2005. – 5 pages, 2 illustrations. – References, 10 titles.

The paper investigates potential possibilities for optimization of power nuclear reactor operation in variable daily loading schedule with accounting for energy utilization. Total fuel consumption is considered as an optimization criterion. The effects of the reactor parameters and energy utilization efficiency coefficient on characteristics of optimal regimes were studied. Total optimization effect was evaluated, and conditions for optimization expediency were defined.

УДК 621.311.25: 621.039

About a Possibility High and Low Pressure Pumps Anomalies Identification Based on Testing Data Analysis \S.T. Leskin, V.V. Kornilova; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of High Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2005. – 8 pages, 1 table, 6 illustrations. – References, 8 titles.

The application of main components method for revealing the abnormal conditions reasons of VVER high and low pressure pumps are discussed. On the basis of selected space transformation model the laws of describing pumps behavior dynamics informative parameters influence on resulting attributes distribution in main components space are received. The parameters caused pumps behavior anomalies occurrence are revealed. The results of data processing of the fourth block of the Balakovo NPP are presented.