

## ИНФОРМАЦИОННЫЙ ПОДХОД ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ КОНТРОЛЯ ПОЛЯ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ В ЯДЕРНОМ РЕАКТОРЕ

**А.М. Загребаев, И.В. Прохорова, Н.В. Овсянникова**

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва*



Предлагается информационный подход при решении задач контроля энерговыделения в ядерном реакторе. Вводятся понятия информационной ценности датчика внутриреакторного контроля и информативности системы датчиков. Показана связь между точностью алгоритма восстановления и его информационными свойствами. Предлагается определение очередности градуировки (ремонта) датчиков ВРК на основе анализа их информационной ценности.

**Ключевые слова:** ядерный реактор, восстановление поля энерговыделения, количество информации, система внутриреакторных датчиков.

**Key words:** nuclear reactor, restoration of power distribution, amount of information, system of in-core detectors.

### ВВЕДЕНИЕ

Все современные алгоритмы восстановления полей основываются на синтезе двух источников информации о поле нейтронов – математической модели реактора и показаний внутриреакторных датчиков. Алгоритм восстановления – это процедура, которая объединяет эти два источника информации. Усилия исследователей при этом сконцентрированы на оптимальной с точки зрения точности восстановления «сшивке» экспериментальной и расчетной информации. Возникает вопрос: где предел совершенствования алгоритма и какими рамками он ограничен?

Пусть количество информации о поле нейтронов, содержащееся в математической модели, равно  $I_m$ , количество информации, содержащееся в показаниях системы датчиков ВРК, равно  $I_d$ , а количество информации о поле нейтронов, которое привносится на этапе применения алгоритма восстановления поля, равно  $I_a$ . Тогда в результате применения алгоритма восстановления мы получим информацию о поле нейтронов в реакторе, равную  $I_m + I_d + I_a$  (здесь знак «+» используется для обозначения объединения). Повышение точности восстановления поля возможно за счет увеличения каждого из трех слагаемых.

Для оценки количества информации в работе использовалась мера Шеннона [1].

Исследования проводились на плоской одномерной модели ядерного реактора и на данных архива эксплуатационных параметров первого блока Курской АЭС

[3]. В качестве модели ядерного реактора использовалось стационарное уравнение диффузии для плоской пластины, которое решалось методом итерации источника [2]. Для моделирования случайного характера поля энерговыделения в используемые при расчете нейтронно-физические константы вносилось случайное возмущение.

### Использование данных файлов состояния первого блока КАЭС

Для исследований были использованы значения мощностей топливных каналов, полученные из файлов состояний Курской атомной электростанции. Считываемые из файлов состояния значения мощности считались «истинными». Для моделирования показаний датчиков в значения энерговыделения в местах расположения датчиков вносилась погрешность. В качестве погрешности рассматривались случайные величины с известным законом и параметрами распределения. Были рассмотрены равномерный и нормальный законы распределения. Математическое ожидание полагалось равным нулю, дисперсия принимала различные значения. Для сокращения объема вычислений рассматривались не все топливные каналы, а только каналы с четными координатами по  $X$  и по  $Y$  (рис.1).

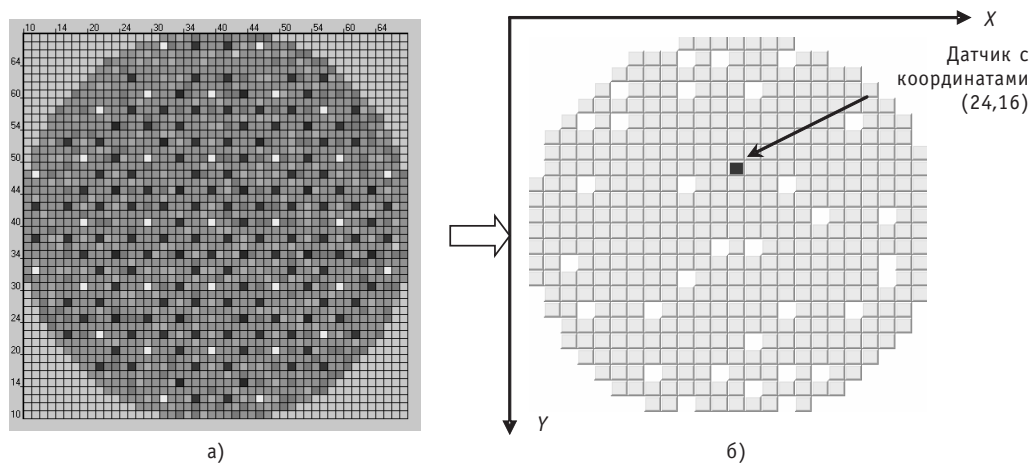


Рис. 1. Используемые экспериментальные данные: а) реальная активная зона реактора РБМК; б) рассматриваемая активная зона (белым цветом на картограмме отмечены каналы без топлива)

### ИНФОРМАТИВНОСТЬ СИСТЕМЫ ДАТЧИКОВ ВРК

Информативностью  $I_{\vec{X} \leftrightarrow \vec{Y}}$  системы датчиков будем называть количество информации, содержащееся в показаниях системы датчиков  $\vec{X}$  о поле энерговыделения  $\vec{Y}$  (т.е. о значениях энерговыделения во всех каналах активной зоны). Таким образом, информативность системы датчиков есть энтропия объединенной системы случайных величин  $\vec{X}$  и  $\vec{Y}$  [1]:

$$I_{\vec{X} \leftrightarrow \vec{Y}} = H(\vec{X}) + H(\vec{Y}) - H(\vec{X}, \vec{Y}) \quad \text{или} \quad (1)$$

$$I_{\vec{X} \leftrightarrow \vec{Y}} = I_{X_1, \dots, X_m \leftrightarrow Y_1, \dots, Y_n} = H(X_1, \dots, X_m) + H(Y_1, \dots, Y_n) - H(X_1, \dots, X_m, Y_1, \dots, Y_n), \quad (2)$$

где  $X_1, \dots, X_m$  – показания датчиков;  $Y_1, \dots, Y_n$  – истинная мощность всех каналов, в том числе каналов с датчиками;  $X_1, \dots, X_m, Y_1, \dots, Y_n$  – объединение систем  $X_1, \dots, X_m$  и  $Y_1, \dots, Y_n$ ;  $H(X_1, \dots, X_m)$ ,  $H(Y_1, \dots, Y_n)$ ,  $H(X_1, \dots, X_m, Y_1, \dots, Y_n)$  – энтропии соответствующих систем.

Для расчета энтропии системы  $k$  случайных величин диапазон изменения каждой случайной величины разбивался на несколько интервалов и энтропия рассчитывалась по формуле

$$H(X_1, \dots, X_k) = - \sum_{i_1=1}^{N_1} \dots \sum_{i_k=1}^{N_k} p_{i_1 \dots i_k} \log_2 p_{i_1 \dots i_k}, \quad (3)$$

где  $p_{i_1 \dots i_k}$  – вероятность того, что одновременно случайная величина  $X_1$  попадет в  $i_1$ -й интервал разбиения, ..., случайная величина  $X_k$  попадет в  $i_k$ -й интервал разбиения.

Предыдущие исследования [4] показали, что закон распределения значения энерговыделения в некоторой точке активной зоны в общем случае отличен от нормального, поэтому в качестве оценки вероятности  $p_{i_1 \dots i_k}$  использовалась статистическая частота.

### Исследования на одномерной модели

На плоской одномерной модели для реактора с однородной загрузкой были проведены исследования по определению оптимального с точки зрения информативности расположения датчиков, причем погрешность задавалась одинаковой для всех датчиков (нормальный закон распределения с дисперсией 5%). На рисунке 2 приведены результаты расчетов для систем из 2 и 3 датчиков.

Из рисунка видно, что оптимальное расположение датчиков отличается от равномерного.

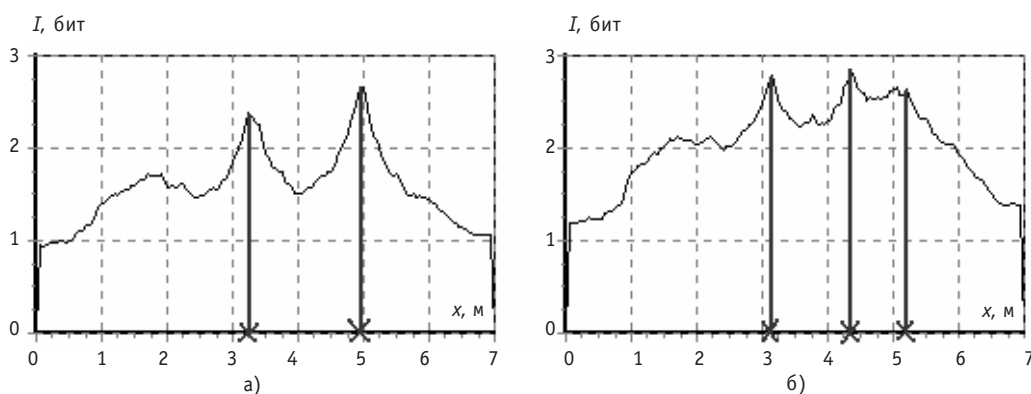


Рис. 2. Оптимальное с точки зрения информативности системы расположение датчиков в активной зоне реактора (координаты датчиков отмечены знаком «х»)

### Исследования на данных файлов состояний

Аналогичные исследования по определению оптимального с точки зрения информативности расположения датчиков были проведены на данных файлов состояний. Для активной зоны, изображенной на рис.16, для систем из 8 и 10 датчиков было рассчитано их оптимальное расположение в активной зоне. Оптимальное расположение фиксированного числа датчиков является единственным с точностью до выбора закона распределения и величины погрешности (исследовались нормальный и равномерный законы распределения с различными значениями дисперсии).

В результате проведенных исследований на основе данных реальной реакторной установки показано, что равномерное по активной зоне расположение датчиков ВРК не является оптимальным с точки зрения информативности (рис. 3).

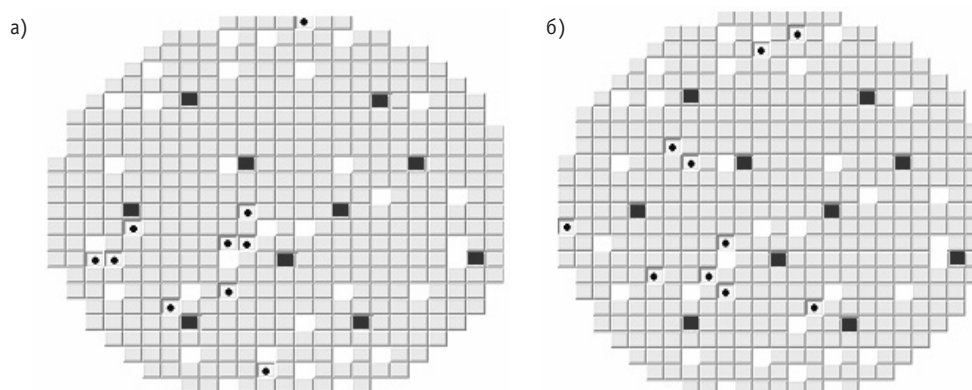


Рис. 3. Равномерное и оптимальное с точки зрения информативности расположение системы из 10 датчиков для различных законов распределения погрешности: а) равномерный закон, дисперсия 3%; б) нормальный закон, дисперсия 2%; знаком ■ отмечены координаты датчиков при их равномерном расположении, знаком □ – координаты датчиков для системы, которая является оптимальной с точки зрения информативности

Этот результат согласуется с результатами, полученными на модели.

На практике при определении количества и расположения датчиков поступают следующим образом. Используя разработанный алгоритм восстановления, варьируют число, расположение и точность датчиков, добиваясь при этом требуемой точности восстановления поля. Понятно, что при таком подходе можно получить оптимальное решение лишь применительно к выбранному алгоритму восстановления.

### ИНФОРМАЦИОННАЯ ЕМКОСТЬ АЛГОРИТМА ВОССТАНОВЛЕНИЯ

Информационный подход предлагается применить и для оценки информационной емкости алгоритма восстановления. Исследования проводились на одномерной модели, для восстановления поля энерговыделения по показаниям датчиков использовалась аппроксимация показаний датчиков различными наборами базисных функций – полиномами различных степеней, гармониками и так называемыми естественными функциями реактора. По результатам исследований можно сделать вывод о том, что более точный с точки зрения ошибки восстановления поля алгоритм приводит к большему значению информации, содержащейся в восстановленном поле, об истинном. При этом с увеличением точности восстановления значение информации стремится к энтропии истинного поля. В таблице 1 приведены значения ошибки восстановления и количество информации, содержащейся в восстановленном поле энерговыделения, об истинном (для случая восстановления полиномами различных степеней).

Таблица 1

#### Результаты аппроксимации показаний датчиков полиномами

Степень полинома	Средний квадрат ошибки восстановления, %*%	Информация об истинном поле, содержащаяся в восстановленном поле, бит
0	3,84	4,72
1	2,37	7,17
2	1,89	7,31
3	1,72	7,54

## ИНФОРМАЦИОННАЯ ЦЕННОСТЬ ДАТЧИКА

Информационную ценность отдельного датчика в системе предлагается оценивать с помощью количества информации о поле энерговыделения, содержащегося в показаниях отдельного датчика.

### Исследования на одномерной модели реактора

Исследования на одномерной модели показали [4], что информативность системы датчиков зависит не только от их погрешности, но и от статистических свойств поля энерговыделения. Информативность отдельного датчика тем больше, чем больше дисперсия поля в точке расположения датчика (рис. 4).

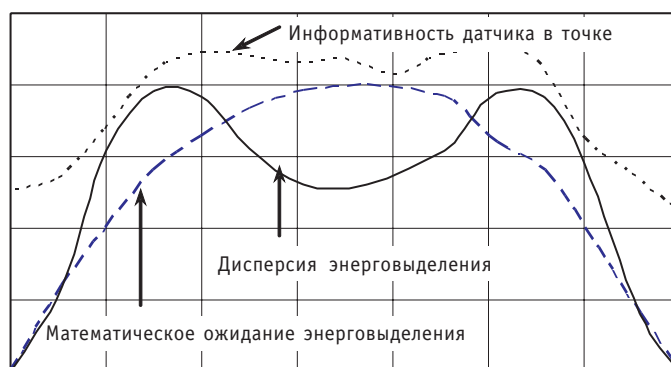


Рис. 4. Зависимость информативности датчика от координаты

### Исследования на данных файлов состояний

Для определения информационной ценности отдельного датчика в заданной системе датчиков было рассчитано значение количества информации, содержащейся в его показаниях, обо всем поле энерговыделения. Затем поочередно из системы исключались датчики и определялось количество информации, содержащееся в новой системе обо всем поле. Таким образом была проведена оценка влияния отсутствия каждого датчика на значение информативности системы.

Исследования проводились для различных значений погрешности датчиков, распределенной по равномерному и нормальному закону. На рисунке 5 приведен пример рассматриваемой системы датчиков.

В таблице 2 для примера, изображенного на рис. 5, приведены значения количества информации о поле энерговыделения, содержащейся в показаниях датчика.

В результате исследований было показано, что удаление датчика с большим значением информации существенно влияет на значение информации системы, т.е. значение информации сокращенной системы заметно отличается от исходной системы. В то же время удаление датчика с маленьким значением информации практически не сказывается на информативности системы. Таким образом, датчики обладают различной информационной ценностью для системы.

По данным файлов состояния была построена картограмма информационного поля (рис. 6). Цвет канала отражает информацию, содержащуюся в показаниях размещенного в этом канале датчика, о поле энерговыделения. Более темным цветом отмечены каналы с большим значением информации обо всем поле.

Одним из возможных применений информационного подхода является решение задачи выбора стратегии градуировки датчиков. Для существующей системы контроля можно определить информационную ценность каждого из датчиков системы. Тогда при невозможности одновременной градуировки всех датчиков в

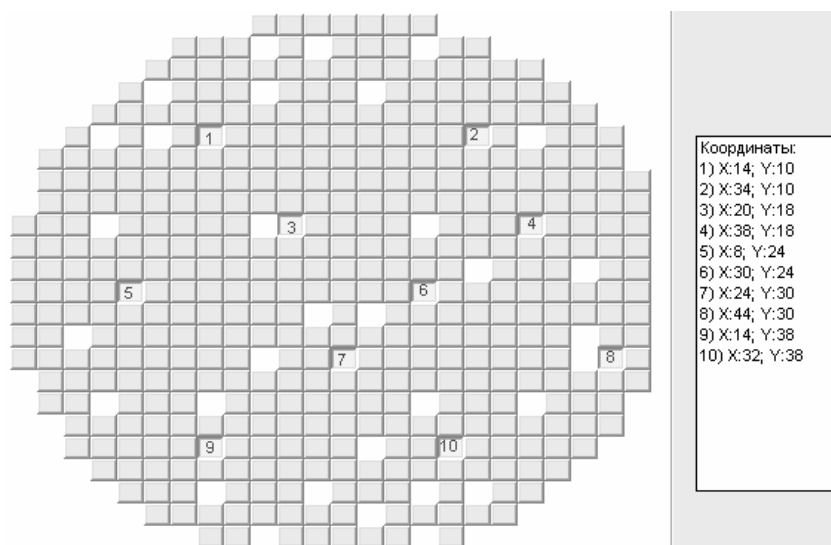


Рис. 5. Пример расположения 10 датчиков

первую очередь следует градуировать датчик с большей информационной ценностью.

## ВЫВОДЫ

Проведены исследования по определению оптимального с точки зрения информативности расположения датчиков. На модели и на данных архива эксплуатационных параметров реального энергоблока с реактором РБМК показано, что для заданного количества датчиков в системе оптимальное с точки зрения информативности расположение отличается от равномерного. Показано, что восстановление поля по показаниям датчиков оптимальной с точки зрения информативности системы дает более точный результат, чем восстановление по показаниям системы, состоящей из того же количества равномерно расположенных датчиков.

Таблица 2

### Результаты исследований.

**Погрешность датчика распределена по нормальному закону, дисперсия 6%**

Номер датчика $i$	Координаты $i$ -го датчика	Информация $i$ -го датчика о поле энерговыделения, бит	Информация системы при исключении $i$ -го датчика (9 датчиков), бит	Информация полной системы датчиков (10 датчиков), бит
1	14,10	0,83	7,49	I=7,52
2	34,10	1,69	7,18	
3	20,18	1,73	7,16	
4	38,18	1,64	7,34	
5	8,24	1,66	7,20	
6	30,24	1,76	7,14	
7	24,30	1,73	7,16	
8	44,30	1,82	7,14	
9	14,38	1,68	7,22	
10	32,38	1,73	7,15	

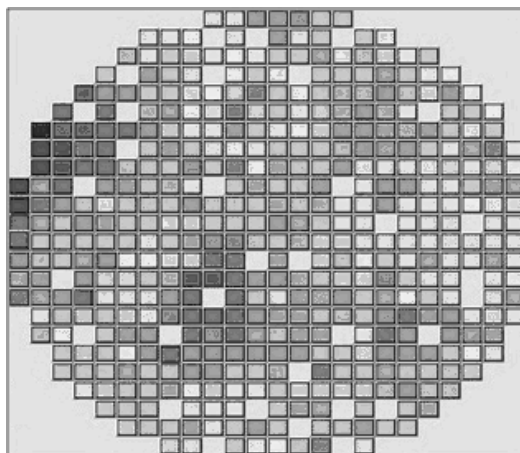


Рис. 6. Картограмма информационного поля

Введено понятие информационной емкости алгоритма восстановления. Показана связь между точностью алгоритма восстановления и его информационными свойствами.

Предлагается использовать понятие информативности при оценке ценности отдельного датчика в системе. Показано, что удаление из системы датчика с большей информационной ценностью оказывает большее влияние на информативность всей системы. Предлагается использовать информационный критерий для определения очередности градуировки (ремонта) датчиков.

### **Литература**

1. Пугачев В.С. Теория вероятностей и математическая статистика. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 496с.
2. Цвайфель П. Физика реакторов/Пер. с англ. – М.: Атомиздат, 1977.
3. Загребаев А.М., Козьмин Л.А. Разработка математического обеспечения для определения статистических характеристик параметров реактора РБМК-1000/Препринт 008-2005. – М.: МИФИ, 2005. – 32 с.
4. Загребаев А.М., Овсянникова Н.В., Розанова М.Н. Исследование информативности системы датчиков внутриреакторного контроля. Научная сессия МИФИ: Сб. научных трудов. Т. 8 «Ядерная энергетика». – М., 2006. – С. 84-85.

Поступила в редакцию 4.12.2009



## ABSTRACTS OF THE PAPERS

### УДК 621.039.543.6

*Dose Characteristics of Neutrons Fields of Spent Ceramic Nuclear Fuel of Various Types* \S.V. Bedenko, F.V. Gnetkov, S.D. Kadochnikov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 7 pages, 2 tables, 1 illustration. – References, 16 titles.

The dose characteristics of the neutron fields spent ceramic uranium compounds were analyzed. A procedure for calculating the neutron component of the radiation characteristics of spent ceramic nuclear fuel was proposed. The causes of significant differences contributions of ( $\alpha$ , n)-reactions in the neutron radiation intensity of spent UO<sub>2</sub>, UC and UN were determined. The simulation results of the radiation field characteristics near the transport container with the results of radiometric experiments were compared.

### УДК 621.039.564

*Informational Approach to Solving Problems of Power Distribution Control in a Nuclear Reactor* \A.M. Zagrebayev, N.V. Ovsyannikova, I.V. Prokhorova; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 7 pages, 2 tables, 6 illustrations. – References, 7 titles.

Informational approach to solving the problems of power distribution control in a nuclear reactor is offered. The definitions of information value of an in-core detector and information of the system of detectors are introduced. Connection between accuracy of a restoration algorithm and its informational properties is shown. The sequence of in-core detectors graduation (repair) definition on the basis of their informational value is offered.

### УДК 621.039.51

*New approach on designing spectrometric neutron radiation radiometer* \V.E. Dreizin, A.A. Grimov, D.I. Logvinov I.N. Mazepa; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 6 pages, 1 illustration. – References, 5 titles.

Results of modeling new method of spectrometric measurements neutron radiation are considered here. This method based on combined signal processing from several detectors with different spectral characteristic with following computer rebuilding energy spectrum of measuring radiation with assistance of neuron net. This net was preliminary trained on simulation models of neuron flow with different energy characteristic.

### УДК 621.039.56

*The Working out of the Finite-Element Dynamic Model of the Third Generation Fuel Assembly of the WWER-440 for the Strength Prove under Seismic Impact* \M.S. Khvostov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 7 pages, 7 illustrations. – References, 3 titles.

A description is given for working out of the finite-element dynamic model of the WWER-440 fuel assembly for the strength prove under seismic impact. The finite-element fuel assembly model worked out in ANSYS code is described. The eigenfrequencies and forms of the structure oscillations are received. The response to the seismic impact by the linear spectrum analysis is calculated. The estimation of the results precision is produced.

### УДК 621.039

*Analysis of the Radiation Monitoring Data by the Distribution-Free Statistic Methods (by the example of the River System Techa-Iset-Tobol-Irtysch Pollution)* \K.V. Lunyova, A.I. Kryshev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 9 pages, 5 tables, 1 illustration. – References, 7 titles.