

УДК 621.039.56

Качур С.А.

Севастопольский национальный университет ядерной энергии и промышленности

## ИДЕНТИФИКАЦИИ ФОРМЫ ПОЛЯ ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЯ В КАМЕРЕ СМЕШЕНИЯ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

Запропоновано класифікацію форм поля тепловиділення, що відображає динаміку деформації поля при зростанні реактивності. Розроблено метод ідентифікації форми поля тепловиділення на основі вимірювань показників процесу теплообміну в камері змішування реактора та використання класифікації форм поля.

Предложена классификация форм поля тепловыделения, отражающая динамику деформации поля при возрастании реактивности. Разработан метод идентификации формы поля тепловыделения на основе измерения показателей процесса теплообмена в камере смешения реактора и использования классификации форм поля.

Classification of forms of the field of thermal flux is offered, reflecting the dynamics of deformation of the field at growth of reactivity. The method of identification of form of the field of thermal flux on the basis of measuring of indexes of process of heat exchange in the chamber of mixing of reactor and use of classification of forms of the field is developed.

$H$  – высота активной зоны реактора;  
 $i$  – номер класса или гармоники функции Бесселя;  
 $k$  – номер источника излучения или номер подкласса;  
 $l$  – индекс направления;  
 $Q$  – мощность реактора;  
 $t$  – время;  
 $z$  – координаты активной зоны (номера ячеек);  
 $\alpha$  – нули функции Бесселя нулевого порядка первого рода;  
 $\alpha'$  – преобразованное значение  $\alpha$ ;  
 $\beta$  – амплитуды гармоник функции Бесселя нулевого порядка первого рода;  
 $\beta'$  – преобразованное значение  $\beta$ ;  
 $\gamma$  – гамма-излучение;

$\Delta$  – смещение;  
 $\theta$  – угол поворота;  
 $\varphi$  – истинное паросодержание.

### Индексы верхние:

$H$  – аксиальное направление;  
 $R$  – радиальное направление.

### Индексы нижние:

$0$  – номинальное значение;  
 $\max$  – деформация поля на максимум;  
 $\min$  – деформация поля на минимум;  
 $\text{MAX}$  – таблица координат максимумов деформации поля;  
 $\text{MIN}$  – таблица координат минимумов деформации поля;  
 $\text{ЯЭУ}$  – ядерная энергоустановка.

Опыт эксплуатации ядерных энергетических установок показывает, что проблема безопасности – проблема потенциально возможных, маловероятных аварий по причине отказа технических систем и ошибок персонала. При анализе аварийных ситуаций основное внимание уделяется неуправляемому увеличению мощности активной зоны, уменьшению расхода теплоносителя и повышению давления в реакторе [1].

Широкое применение в приложении к динамике ядерных реакторов с распределенными параметрами нашел метод гармоник [2].

Наибольший интерес с точки зрения прогнозирования аварийных ситуаций представляет область быстрых процессов, которая определяется постоянной времени прогрева топлива и образования пара и равна десяткам секунд.

В работах [3-5] предложен подход к идентификации локальной деформации поля тепловыделения на основе определения наиболее «горячих» точек, соответствующих увеличению значений объемного паросодержания. Экспериментальное исследование струйного течения пароводяного потока в объеме тягового участка модели кипящего реактора и роль камеры

смещения, расположенной над активной зоной реактора, рассмотрены в [6]. Определена область, структура потока которой близка к гомогенной.

В больших реакторах в результате переходных процессов наряду с изменениями полной мощности могут возникать деформации распределения мощности по объему активной зоны. Известно, что распределение тепловыделения по высоте активной зоны следует закону синуса, а в радиальном направлении изменяется по функции Бесселя [7]. Оперативность метода гармоник достаточна для идентификации деформаций энергораспределения по объему активной зоны при медленных процессах (ксеноновом отравлении реактора), но не приемлема в случае быстрых процессов (переходных процессов). Поэтому для прогнозирования аварийной ситуации, связанной с ростом реактивности, необходимо разработать оперативный метод качественного определения формы поля тепловыделения с расчетом координат и количественных показателей, соответствующих минимумам и максимумам этого поля.

Цель исследования – повышение оперативности определения теплораспределения в активной зоне реактора на основе классификации форм поля тепловыделения.

Для достижения поставленной цели предлагается определить классы форм поля тепловыделения, элементы этих классов и правило классификации, т.е. решить следующие задачи:

- 1) разработка критерия классификации;
- 2) определение множества классов форм поля тепловыделения на основе анализа законов распределения тепловыделения в радиальном и аксиальном направлениях;
- 3) разработка схемы измерения истинного паросодержания в камере смещения для получения экспериментальной информации о текущем тепловыделении;
- 4) разработка метода идентификации формы поля тепловыделения на основе принятой классификации и показаний детекторов  $\gamma$ -излучения, расположенных в соответствии с предложенной схемой.

Для определения классов форм распределения будем использовать метод гармоник. Поскольку распределение тепловыделения описывается функцией Бесселя и определяется на основе показаний детекторов, расположенных в гомогенной области камеры смещения, то для характеристики классов выберем пространственные формы, соответствующие наложению гармоник высших порядков на форму основного распределения. Четыре класса пространственного распределения определены нулевой, первой, второй и третьей гармониками.

В качестве нулевого класса определим класс, для которого отсутствует искажение формы поля тепловыделения, как по радиусу, так и по высоте активной зоны. Нулевому классу соответствует номинальное значение мощности реактора  $Q_0$ , нулю функции Бесселя нулевого порядка первого рода ( $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ ) и амплитуды гармоник ( $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ ). Кроме того, амплитуде  $\beta_0$  основной гармоники для центра активной зоны реактора (координаты (0;0) и номер ячейки  $z_0$ ) сопоставлено расчетное теоретическое максимальное значение мощности в радиальном направлении  $Q_0^R$ , а нулю функции  $\alpha_0$  – расчетное теоретическое максимальное значение мощности в аксиальном направлении  $Q_0^H$ . Нулевой класс является базисным для описания всех остальных классов.

При увеличении мощности реактора  $Q$  ( $Q/Q_0 > 1$ ) искажение формы поля тепловыделения по радиусу не происходит, но имеет место деформация формы по высоте (перемещение максимума в верхнюю часть активной зоны). При уменьшении мощности реактора  $Q$  ( $Q/Q_0 < 1$ ) происходит деформация формы поля тепловыделения как по радиусу, так и по высоте (перемещение максимума в нижнюю часть активной зоны).

Критерием отнесения формы поля тепловыделения к  $i$ -у классу является диапазон мощности реактора при  $dQ/dt \neq 0$ , в рамках которого изменение амплитуды нулевой гармоники приводит к появлению  $i$ -й гармоники.

Независимо от величины мощности

реактора форма функции Бесселя не меняется. Поэтому при появлении очередной гармоники вследствие изменения мощности необходимо производить перерасчет значений амплитуд гармоник и нулей функции Бесселя, которые являются характеристиками формы.

Выполним описание классов форм тепло-выделения сначала для радиального направления, а затем на их основе, отражая взаимосвязь изменений формы в двух направлениях, для аксиального направления.

Для первого класса параметрами являются координаты активной зоны (номера ячеек)  $z_{\min}(1)$  и  $z_{\max}(1)$ , которым соответствует деформация поля на минимум и максимум, а также их безразмерные значения  $\beta_{\min}(1)$  и  $\beta_{\max}(1)$ . Решая систему линейных уравнений, полученную на основе анализа функции Бесселя, осуществляем пересчет основных характеристик формы для первого класса –  $\alpha'_0(1)$ ,  $\alpha'_1(1)$ ,  $\beta'_0(1)$ ,  $\beta'_1(1)$ .

$$\begin{cases} \alpha'_1(1) = \alpha_0 \\ \beta_0 = \beta'_0(1) + \beta'_1(1) \\ \alpha'_0(1) = \frac{\alpha_0}{\alpha_1} \alpha'_1(1) \\ \beta'_1(1) = \frac{\beta_1}{\beta_0} \beta'_0(1) \end{cases} \quad (1)$$

Используем приближенный расчет  $\beta_{\min}(1)$  и  $\beta_{\max}(1)$ , поскольку в случае быстрых процессов при определении деформации поля значение имеет не столько высокая точность расчета параметров, сколько скорость их определения,

$$\beta_{\min}(1) = \frac{3}{4} \beta'_0(1) - \beta'_1(1), \quad (2)$$

$$\beta_{\max}(1) = \frac{3}{4} \beta'_0(1) + \beta'_1(1). \quad (3)$$

Аналогично для второго класса параметрами являются координаты деформации минимума  $z_{\min}(2)$  и максимума  $z_{\max}(2)$  и соответственно безразмерные значения  $\beta_{\min}(2)$  и  $\beta_{\max}(2)$ . Расчет ведется по формулам

$$\begin{cases} \alpha'_2(2) = \alpha_0 \\ \beta_0 = \beta'_0(2) + \beta'_1(2) + \beta'_2(2) \\ \alpha'_0(2) = \frac{\alpha_0}{\alpha_1} \alpha'_1(2) \\ \alpha'_2(2) = \frac{\alpha_2}{\alpha_1} \alpha'_1(2) \\ \beta'_1(2) = \frac{\beta_1}{\beta_0} \beta'_0(2) \\ \beta'_2(2) = \frac{\beta_2}{\beta_0} \beta'_0(2) \end{cases}, \quad (4)$$

$$\beta_{\min}(2) = \beta'_0(2) - \beta'_2(2), \quad (5)$$

$$\beta_{\max}(2) = \beta'_0(2) + \beta'_2(2). \quad (6)$$

Для третьего класса задаются координаты  $z_{\min 1}(3)$  и  $z_{\min 2}(3)$  минимумов и максимумов  $z_{\max 1}(3)$  и  $z_{\max 2}(3)$  поля, а безразмерные значения  $\beta_{\min 1}(3)$ ,  $\beta_{\min 2}(3)$ ,  $\beta_{\max 1}(3)$  и  $\beta_{\max 2}(3)$  рассчитываются из соотношений

$$\begin{cases} \alpha'_3(3) = \alpha_0 \\ \beta_0 = \beta'_0(3) + \beta'_1(3) + \beta'_2(3) + \beta'_3(3) \\ \alpha'_0(3) = \frac{\alpha_0}{\alpha_1} \alpha'_1(3) \\ \alpha'_2(3) = \frac{\alpha_2}{\alpha_1} \alpha'_1(3) \\ \alpha'_3(3) = \frac{\alpha_3}{\alpha_1} \alpha'_1(3) \\ \beta'_1(3) = \frac{\beta_1}{\beta_0} \beta'_0(3) \\ \beta'_2(3) = \frac{\beta_2}{\beta_0} \beta'_0(3) \\ \beta'_3(3) = \frac{\beta_3}{\beta_0} \beta'_0(3) \end{cases}, \quad (7)$$

$$\beta_{\min 1}(3) = \beta_{\min 2}(3) = \frac{3}{4} \beta'_0(3) - \beta'_3(3), \quad (8)$$

$$\beta_{\max 1}(3) = \beta_{\max 2}(3) = \frac{3}{4} \beta'_0(3) + \beta'_3(3). \quad (9)$$

Сопоставим классам форм при  $Q/Q_0 > 1$  номера с четвертого по шестой по мере роста мощности реактора. Максимальная величина мощности по радиусу активной зоны для 4-6 классов соответствует ячейки  $z_0$ . Анализируя

функцию Бесселя, рассчитаем параметры формы поля  $\beta'_0(i)$  и  $\alpha'_0(i)$ ,

$$\beta'_0(i) = \sum_{j=0}^{i-3} \beta_j \quad (i = \overline{4,6}), \quad (10)$$

$$\alpha'_0(i) = \alpha_{i-3} \quad (i = \overline{4,6}), \quad (11)$$

$$\beta_{\max}(i) = \beta'_0(i) \quad (i = \overline{4,6}). \quad (12)$$

Максимальные и минимальные величины мощности по радиусу активной зоны рассчитываются соответственно по формулам

$$Q_{\max}^R(i) = Q_0^R \frac{\beta_{\max}(i)}{\beta_0} \quad (i = \overline{1,6}), \quad (13)$$

$$Q_{\min}^R(i) = Q_0^R \frac{\beta_{\min}(i)}{\beta_0} \quad (i = \overline{1,3}). \quad (14)$$

Нижняя (при  $Q/Q_0 < 1$ ) или верхняя граница (при  $Q/Q_0 > 1$ ) диапазона мощности  $i$ -го класса определяется следующим образом

$$Q^{(i)} = Q_0 \frac{\beta'_0(i)}{\beta_0} \quad (|i = \overline{1,6}|). \quad (15)$$

Рассмотрим деформацию формы поля тепловыделения в аксиальном направлении. Определим смещение  $\Delta H$  по высоте ( $H$  – высота активной зоны реактора) максимума распределения относительно верха активной зоны для 4-6 классов

$$\Delta H(i) = \frac{H}{2} \frac{\alpha_0 \beta'_0(i)}{\alpha'_0(i) \beta_0} \quad (i = \overline{4,6}). \quad (16)$$

Смещение распределения по высоте относительно низа активной зоны для 1-3 классов

$$\Delta H(i) = \frac{H}{2} \frac{\alpha'_0(i) \beta_0}{\alpha_0 \beta'_0(i)} \quad (i = \overline{1,3}). \quad (17)$$

Величина максимума в аксиальном направлении может быть описана соотношениями

$$Q_{\max}^H(i) = Q_0^H \left( 1,5 - \frac{\Delta H(i)}{H} \right) \quad (i = \overline{4,6}), \quad (18)$$

$$Q_{\max}^H(i) = Q_0^H \left( 0,5 + \frac{\Delta H(i)}{H} \right) \quad (i = \overline{1,3}). \quad (19)$$

Исследования показали, что погрешность для предложенного в виде классификации подобия кусочно-линейной аппроксимации функции Бесселя не превышает 1 %, кроме случая для области близкой к границе ( $Q^{(3)}$ ,  $Q^{(6)}$ ) третьей

гармоники (погрешность около 10 %). При исследовании функции Бесселя в результате математического моделирования было определено, что при наличии влияния третьей гармоники в случае превышения двух третей ее амплитуды процесс меняет характеристики, т.е. становится неуправляемым с точки зрения роста мощности реактора. Таким образом, тепловая мощность реактора должна находиться в диапазоне

$$\frac{Q_0}{\beta_0} \left( \sum_{i=0}^2 \beta'_i(3) + \frac{2}{3} \beta'_3(3) \right) \leq Q \leq \frac{Q_0}{\beta_0} \left( \sum_{i=0}^2 \beta_i + \frac{2}{3} \beta_3 \right). \quad (20)$$

Для определения элементов класса будем исходить из того, что исходная система координат априорного поля тепловыделения задана и для нее определена нумерация ячеек активной зоны. Каждый класс имеет один подкласс, содержащий рассчитанные значения приведенных выше параметров формы поля тепловыделения для исходной системы координат. Очевидно, что число подклассов для классов, имеющих асимметрию поля в радиальном направлении, должно быть больше одного. К таким классам относятся 1-й, 2-й и 3-й.

С целью определения смещения относительно центра априорного поля тепловыделения, описанного в нулевом классе, используется четыре радиальных направления  $\theta$  с шагом угла поворота  $\Delta\theta = 45^\circ$  относительно исходной системы координат. Таким образом, класс включает четыре подкласса, каждый из которых содержит информацию о номерах ячеек для минимумов и максимумов в соответствии с углом поворота априорного поля. Радиальные направления используются при разработке схемы детекторов в камере смешения для определения истинного паросодержания.

Для идентификации формы поля тепловыделения по периметру камеры смешения над активной зоной реактора установлено 4 источника  $\gamma$ -излучения, каждый из которых определяет три направления  $\gamma$ -лучей, и 12 детекторов  $\gamma$ -излучения, фиксирующих излучения по соответствующим направлениям. Схема размещения источников и детекторов  $\gamma$ -излучения

приведена на рис. 1. Одновременно по двенадцати направлениям производится измерение истинного паросодержания  $\varphi(k, l)$  ( $k=1, 4; l=-1, 1; l$  – индекс направления  $k$ -го источника излучения).

Связь подклассов форм и измерений истинного паросодержания отражает таблица МАХ (табл. 1), содержащая координаты (X – номер некоторой ячейки активной зоны ректора, для третьего класса определены два максимума) возможных максимумов деформации поля, т.е.

максимумов значений истинного паросодержания по направлениям  $\{-1; 0; +1\}$  от каждого из четырех источников излучения. Аналогичным образом строится таблица MIN для координат возможных минимумов деформации поля. Таблицы МАХ и MIN описывают подклассы 1, 2 и 3 классов.

На основе экспериментальных данных, полученных от детекторов  $\gamma$ -излучения, описания классов и таблиц координат МАХ и MIN разработано правило классификации, т.е.

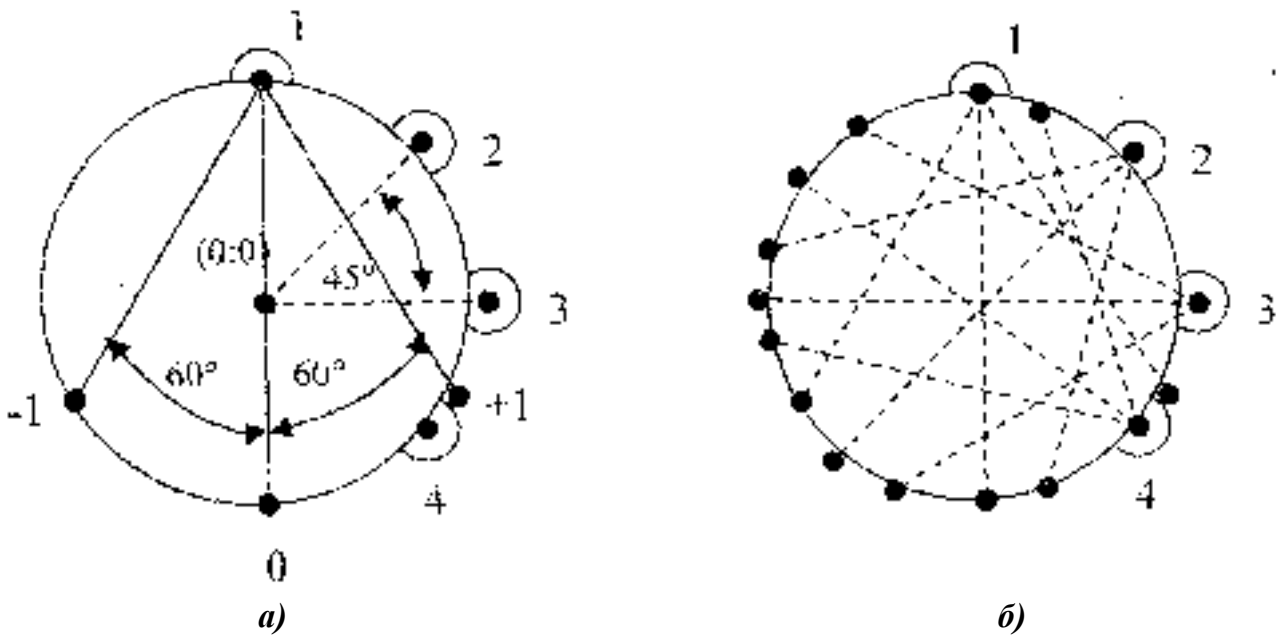


Рис.1. Схема размещения детекторов  $\gamma$ -излучения по периметру камеры смещения для одного источника (а) и для четырех источников (б):  
● – детектор, ⊙ – источник излучения.

Табл. 1. Координаты максимумов деформации поля тепловыделения

Направление излучения	Классы форм											
	1				2				3			
	Подклассы форм (источники излучения)				Подклассы форм (источники излучения)				Подклассы форм (источники излучения)			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
-1	X	X	X	X								
0									X, X	X, X	X, X	X, X
1	X	X	X	X								
(0;0)					X	X	X	X				

правило отнесения наблюдаемого состояния поля тепловыделения к подклассу определенного класса. Правила классификации положены в основу метода идентификации формы поля тепловыделения.

Этапы метода идентификации формы поля тепловыделения при изменении мощности:

1) Осуществляем проверку условия (20). При невыполнении соотношения выдаем сообщение о критическом уровне мощности и пере-

$$B(i) = (Q > Q_0) \wedge (Q^{(i-1)} < Q \leq Q^{(i)}) \wedge (4 \leq i \leq 6) \vee (Q < Q_0) \wedge (Q^{(i)} < Q \leq Q^{(i-1)}) \wedge (1 \leq i \leq 3). \quad (21)$$

Форма поля описывается  $i$ -м классом, если  $B(i) = 1$ .

3) Если  $i \in \{1, 2, 3\}$ , то анализируем результаты измерений детекторов  $\gamma$ -излучения, иначе форма поля относится к первому подклассу и переходим к п. 5.

Определяем по  $l = \overline{-1, 1}$  направлениям  $k = \overline{1, 4}$  источников излучения пары  $(k_{\max}, l_{\max})$  и  $(k_{\min}, l_{\min})$ , для которых истинное паросодержание принимает минимальное и максимальное значения  $\varphi_{\max}$  и  $\varphi_{\min}$

$$\varphi_{\max} = \max_{k, l} \varphi(k, l), \quad (22)$$

$$\varphi_{\min} = \min_{k, l} \varphi(k, l). \quad (23)$$

Правило классификации 2 (отнесение формы поля к  $k$ -му подклассу ( $k = \overline{1, 4}$ )): форма поля тепловыделения относится к  $k$ -му подклассу, если максимальные значения истинного паросодержания измерено на одном из направлений  $\gamma$ -излучения от  $k$ -го источника  $\gamma$ -лучей.

4) Анализируем таблицы MAX и MIN для определения координат наибольшей деформации поля.

Если  $(i = 2) \wedge (\varphi(1, 0) > \varphi(1, -1))$ , то рассматривается только таблица MAX, иначе – таблица MIN.

5) Выдаем информацию о форме поля тепловыделения по радиусу и высоте, координатах и значениях мощности, соответствующих минимумам и максимумам поля в радиальном и аксиальном направлении. Рассчитываем текущие значения экстремумов в радиальном направлении

даче управления оператору.

2) Правило классификации 1 (отнесение формы поля к  $i$ -му классу ( $i = \overline{0, 6}$ )): форма поля тепловыделения относится к  $i$ -му классу, если значение текущей мощности реактора попадет в допустимый диапазон мощности  $i$ -го класса.

Для реализации правила классификации рассчитываем границы диапазона  $i$ -го класса  $Q^{(i-1)}$  и  $Q^{(i)}$  по формуле (15) и проверяем истинность выражения

$$Q_{\max}^R = Q \frac{Q_{\max}^R(i)}{Q^{(i)}}, \quad (24)$$

$$Q_{\min}^R = Q \frac{Q_{\min}^R(i)}{Q^{(i)}}, \quad (25)$$

текущие значение смещения  $\Delta H$

$$\Delta H = \frac{Q^{(i)}}{Q} \Delta H(i) \text{ при } 4 \leq i \leq 6, \quad (26)$$

$$\Delta H = \frac{Q}{Q^{(i)}} \Delta H(i) \text{ при } 1 \leq i \leq 3 \quad (27)$$

и текущие значения экстремумов в аксиальном направлении

$$Q_{\max}^H = Q_0^H \left( 1,5 - \frac{\Delta H}{H} \right) \text{ при } 4 \leq i \leq 6, \quad (28)$$

$$Q_{\max}^H = Q_0^H \left( 0,5 + \frac{\Delta H}{H} \right) \text{ при } 1 \leq i \leq 3. \quad (29)$$

### Выводы

1. Существующие методы идентификации деформаций энергораспределения по объему активной зоны при возрастании реактивности обладают недостаточной оперативностью, например, для случая пусковой аварии в реакторе, отравленном ксеноном. В значительной мере это связано с большими временными затратами на определение динамических характеристик пространственного распределения мощности, которые являются следствием сложности математического описания протекающих в реакторе

процессов.

2. Предложено повысить оперативность идентификации деформаций энергораспределения за счет измерения показателей процесса теплообмена в камере смешения реактора и использования классификации форм поля тепловыделения. Разработан метод качественного определения формы поля тепловыделения с расчетом координат и мощности, соответствующих минимумам и максимумам этого поля. Определены критические значения тепловой мощности на основе результатов моделирования функции Бесселя.

3. Использование разработанных критерия классификации, описания классов форм поля тепловыделения, схемы измерения истинного паросодержания в камере смешения дало возможность снизить размерность задачи идентификации и время ее решения. Погрешность предложенного описания формы не превышает 1 % для мощности допустимого диапазона мощности.

4. Предложенный подход к идентификации формы поля тепловыделения может быть использован для усовершенствования систем контроля и диагностики крупных кипящих, водо-водяных и транспортных реакторов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Емельянов И.Я., Ефанов А.И., Константинов Л.В. Научно-технические основы управления ядерными реакторами. – М.: Энергоиздат, 1981. – 360 с.
2. Бахметьев А.М., Самойлов О.Б., Усынов А.М. Методы оценки и обеспечения безопасности ЯЭУ. – М.: Энергоиздат, 1988. – 136 с.
3. Попов И.А., Качур С.А. Метод идентификации паросодержания в камере смешения ядерного реактора ВВЭР // Зб. наук. пр. СКУЯ-ЕтаП – Вып. 2 (30). – Севастополь: СКУЯЭиП, 2009. – С. 36-43.
4. Попов И.А., Качур С.А. Идентификация процесса поверхностного кипения теплоносителя в активной зоне АЭУ с ВВЭР // Зб. наук. пр. СКУЯЕтаП – Вып. 4(32). – Севастополь: СКУЯЭиП, 2009. – С. 68-76.
5. Попов И.А., Качур С.А. Адаптивное управление процессом кипения ядерного реактора ВВЭР на основе моделей сетей Петри и метода наиболее «горячих» точек // Зб. наук. пр. СКУЯЕтаП. – Вып. 3 (31). – Севастополь: СКУЯЭиП, 2009. – С. 40-48.
6. Попов И.А. Экспериментально-теоретическая оценка стабильного течения теплоносителя в объеме камеры смешения ядерного реактора // Зб. наук. пр. СКУЯЕтаП – Вып. 3 (27). – Севастополь: СКУЯЭиП, 2008. – С. 23-31.
7. Крамер Э.У. Ядерные реакторы с кипящей водой. – М.: Из-во иностр. лит-ры, 1960. – 509 с.

Получено 17.03.2011 г.