

УДК 681.51

**МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ НЕЙТРОННО-ШУМОВОГО КОНТРОЛЯ КИПЕНИЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В АКТИВНОЙ ЗОНЕ РЕАКТОРОВ ВВЭР**

**Иванов В.И., Иванов Н.И.**

*Научно исследовательское учреждение «Институт ядерных проблем» БГУ  
Минск, Республика Беларусь*

В системе обеспечения безопасности эксплуатации водо-водяных энергетических реакторов (ВВЭР) АЭС одной из важнейших задач является контроль кипения теплоносителя (ТН) во внутриреакторной зоне [1–3]. Экспериментальный контроль времени и мест возникновения кипения ТН по высоте тепловыделяющих сборок (ТВС) позволяет уточнять реальные условия теплосъема в конкретной активной зоне, предотвращать возникновение теплогидравлических кризисов и преждевременных разрушений, существенно точнее определять проектные пределы более напряженных активных зон реактора. Штатные системы нейтронно-шумового контроля [2, 3] основаны на выявлении локальных уменьшений плотности ТН из-за появления паровой составляющей в зонах кипения по распределениям интенсивности «быстрой» шумовой составляющей нейтронного потока  $\tilde{U}_{N,i} = f(H)$  по высоте ТВС. Это обеспечивается для каждой ТВС 7-ми элементными линейками родиевых детекторов прямой зарядки (ДПЗ).

Существенные сложности в нейтронно-шумовой диагностике начальных стадий локального поверхностного кипения ТН во внутриреакторной зоне ВВЭР заключаются в том, что флуктуации плотности ТН обусловлены не только вариациями плотности из-за локальных изменений паросодержания в зонах поверхностного кипения на ТВС, но и за счет флуктуаций плотности ТН, обусловленных рядом технологических факторов, таких как: вращения лопаток главных циркуляционных насосов, различной температуры петель и холодных ниток первого контура, неоднородности перемешивания ТН в нижней камере смешения, гидроакустических волн, примесей. При этом эффект переноса технологических флуктуаций плотности ТН по высоте ТВС приводит к сложению сигналов со сдвигом фаз, как обусловленных технологических флуктуаций плотности, так и обусловленных поверхностным кипением. Применяемый в [2, 3] принцип получения распределений интенсивности флуктуаций плотности нейтронного потока по высоте ТВС  $\tilde{U}_{N,i} = f(H)$  путем одновременного непрерывного измерения сигналов всех ДПЗ, распределенных по высоте ТВС вдоль движущегося со скоростью  $W$  потока ТН, приводит к эффекту свертки флуктуаций плотности ТН различной природы, что затрудняет обнаруживать с высокой достоверностью локальное поверхностное кипение ТН на ранних стадиях.

Суть предложенного нами метода заключается в получении однократных распределений интенсивности шумовой составляющей нейтронного потока по высоте ТВС  $\tilde{U}_{N,i} = f(H)$  на малых парциальных объемах ТН, характеризующихся квазистабильной технологической плотностью в пределах времени получения однократного распределения  $\tilde{U}_{N,i} = f(H)$ . Это обеспечивается путем последовательной развертывающей выборки и измерения переменной (шумовой) составляющей сигналов всех  $n = 7$  детекторов линейки, синхронизированной со скоростью ТН  $W$  вдоль ТВС. Временная диаграмма метода развертывающей выборки (МВР) детекторов нейтронов по высоте ТВС приведена на рисунке 1, где каждый из сигналов  $1с \div 7с$  определяет моменты выборки сигналов соответствующих детекторов нейтронов ДПЗ1 ÷ ДПЗ7.

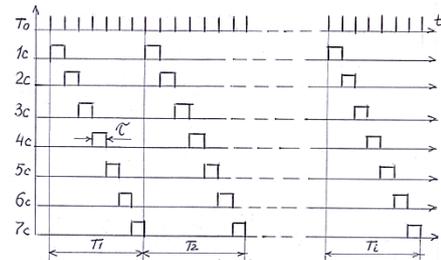


Рисунок 1 – Временная диаграмма МВР детекторов нейтронов

Каждый цикл измерения однократной реализации  $\tilde{U}_{N,i} = f(H)$  начинают с детектора нижней зоны ТВС (1с, ДПЗ1) и завершают детектором верхней зоны (7с, ДПЗ7). На каждом цикле  $T_i$  получение распределений  $\tilde{U}_{N,i} = f(H)$  осуществляется путем измерения шумовой составляющей сигналов детекторов в дискретные моменты времени  $t_i$ , которые определяются для каждого  $i$ -того детектора нейтронов в линейке из соотношения:

$$t_i = (i - 1) \times (H/n W), \quad (1)$$

где  $i$  – позиционный номер детектора в линейке;  $H$  – высота (длина) ТВС;  $n$  – количество детекторов по высоте ТВС;  $W$  – скорость теплоносителя в ТВС.

Частота развертывающей выборки детекторов:

$$F_0 = 1/T_0 \cong n \frac{W}{H}; \quad (2)$$

длительность выборки сигналов детекторов

$$\tau \leq H/n W. \quad (3)$$

Реализации МРВ требует обеспечения соответствия частоты развертывающей выборки  $F_0$  значениям скорости  $W$  потока ТН в реакторе.

Длительность полного однократного цикла получения распределений  $\tilde{U}_{N,i} = f(H) T_i$  определяется уравнением:

$$T \cong H/W \quad (4)$$

При определении временных параметров развертывающей выборки зададимся возможными абсолютными отклонениями реальной скорости потока ТН в реакторе  $\pm \Delta W$ . В этой связи справедливы уравнения для длительностей циклов развертки с учетом  $\pm \Delta W$ :

$$T_1 = \frac{H}{W + \Delta W}, \quad (5)$$

$$T_2 = \frac{H}{W - \Delta W}. \quad (6)$$

Потребуем, чтобы разность длительностей:

$$T - T_1 \leq \tau_k, \quad (7)$$

$$T_2 - T \leq \tau_k, \quad (8)$$

где  $\tau_k$  – временной интервал корреляции плотности входного потока ТН.

С учетом уравнений (5) и (6) можно записать:

$$\frac{H}{W} - \frac{H}{W + \Delta W} \leq \tau_k, \quad (9)$$

$$\frac{H}{W - \Delta W} - \frac{H}{W} \leq \tau_k. \quad (10)$$

Из уравнений (9) и (10) получены выражения для определения допустимых значений флуктуаций скорости ТН  $\pm \Delta W$  для обеспечения синхронизации развертывающих преобразований в зависимости от интервала корреляции плотности ТН  $\tau_k$ .

$$-\Delta W \leq \frac{\tau_k W^2}{H + \tau_k W}, \quad (11)$$

$$+\Delta W \leq \frac{\tau_k W^2}{H - \tau_k W} \quad (12)$$

и относительных значений флуктуаций

$$+\varepsilon_W = \Delta W / W \text{ и } -\varepsilon_W = -\Delta W / W.$$

Графики зависимостей  $+\varepsilon_W = f(\tau_k)$  и  $-\varepsilon_W = f(\tau_k)$  представлены на рисунках 2, 3.

Данные графики показывают, что требования к точности синхронизации выборки детекторов нейтронов возрастают с уменьшением интервала корреляции флуктуаций технологической плотности ТН и позволяют определять границы возможных допусков флуктуаций скорости ТН в реакторе для задания временных параметров развертывающих преобразований МРВ.

Сравнение обнаружительной способности начальных стадий поверхностного кипения методами [2, 3] и МРВ проводилось методом численного моделирования на основе модели потока ТН

со слабокоррелированной функцией плотности, подчиняющейся распределению Гаусса с различной дисперсией и временем корреляции плотности в пределах  $\tau_k = 0,05 \div 3$  с при следующих параметрах:

- скорость ТН  $W = 4,5$  м/с;
- высота обогреваемой зоны ТВС  $H = 3,5$  м;
- число ДПЗ в линейке  $n = 7$ .

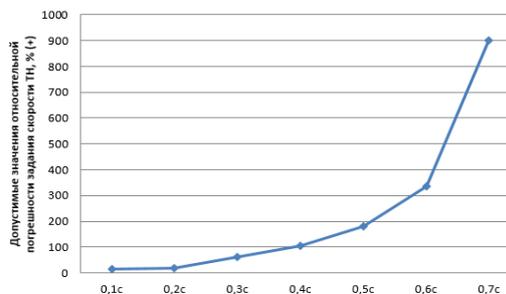


Рисунок 2 – График зависимости  $+\varepsilon_W = f(\tau_k)$

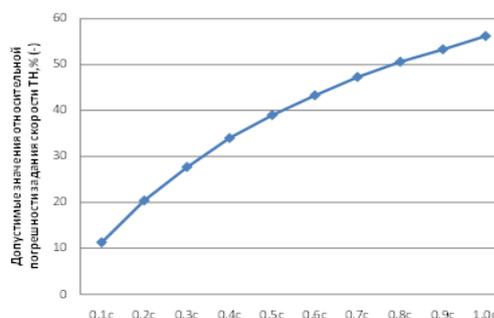


Рисунок 3 – График зависимости  $-\varepsilon_W = f(\tau_k)$

Результаты численного моделирования свидетельствуют о том, что сравниваемые методы имеют примерно одинаковую обнаружительную способность только при относительно больших интервалах корреляции технологической плотности ТН, а именно при  $\tau_k \geq 0,8$  с. При  $\tau_k < 0,8$  с эффективность обнаружения начальных стадий поверхностного кипения МРВ монотонно увеличивается с уменьшением времени корреляции и увеличением дисперсии флуктуаций технологической плотности ТН. Так, например, при  $\tau_k = \frac{H}{n} W \approx 0,11$  с повышение чувствительности обнаружения поверхностного кипения ТН возрастает в 4–5 раз.

Повышение чувствительности МРВ достигается путем минимизации влияния технологических флуктуаций плотности ТН на оценку флуктуаций шумовой составляющей нейтронного потока, обусловленных изменениями плотности теплоносителя из-за появления паровой составляющей в зоне локального кипения по высоте ТВС.

#### Литература

1. Безопасность ядерных энергетических установок / О.Б. Самойлов, Г.Б. Усынин, А.М. Бахметьев. – М.: Энергоиздат, 1989 – 280 с.

2. Семченков Ю.М., Мильто В.А., Шумский Б.Е. Внедрение методики контроля кипения теплоносителя в активной зоне ВВЭР – 1000 в систему внутриреакторной шумовой диагностики // Атомная энергия. – 2008. – Т. 105, вып. 2. – С. 79–82.

3. Калинушкин А.Е., Семченков Ю.М. Современная система контроля, управления и диагностики реакторов ВВЭР большой мощности // Доклады БГУИР. – 2015. – № 2(88). – С. 81–85.

УДК 54.087:681.2.082

## ИССЛЕДОВАНИЕ СЕНСОРНОГО ОТКЛИКА ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ СЕНСОРОВ НА КРЕМНИЕВОЙ ПОДЛОЖКЕ

Реутская О.Г.<sup>1</sup>, Таратын И.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>ОАО «Минский НИИ радиоматериалов»  
Минск, Республика Беларусь

Определение количественного и качественно состава окружающей среды в реальных условиях проводят по средствам различных датчиков и систем. Химические сенсоры являются одними из наиболее оптимальных устройств в соотношении цены и качества. В качестве газочувствительных слоев в таких сенсорах используют каталитические и полупроводниковые соединения. Для снижения энергопотребления при сохранении высокого уровня чувствительности применяют полупроводниковые слои, полученные по золь-гель технологии, которые позволяют достигать качественный результат, а также стабильное и долговременное определение газового состава анализируемой среды [1, 2].

Выбор состава газочувствительного слоя обеспечивает уровень сенсорного отклика к определяемому газу. Это связано с процессами сорбции-десорбции, проходящими на поверхности и внутри самого слоя.

Общепринятая схема подключения сенсорного устройства включает нагреватель и пару информационных электродов, на поверхности которых размещается детектирующий слой. Сигнал определяется величиной изменяющегося напряжения или электросопротивления между электродами [1].

В данной работе представлен полупроводниковый газовый сенсор, выполненный на кремниевой подложке. На поверхности подложки были сформированы нагреватель и информационные электроды. Размещена вся топология на одной стороне кристалла на поверхности мембраны, толщиной 100–120 мкм (рисунок 1).

Газочувствительный слой сформирован на поверхности встречно-штыревой системы. В состав него входит композиция полупроводниковых материалов  $\text{In}_2\text{O}_3 + \text{SnO}_2$ . Выбор такого состава обусловлен высокой реакционной способностью при воздействии горючих и токсичных газов.

Особенностью такого сенсора является то, что газочувствительный слой одновременно является нагревателем и газоаналитическим слоем в схеме

подключения устройства. Вольтамперные характеристики сенсора представлены на рисунке 2.

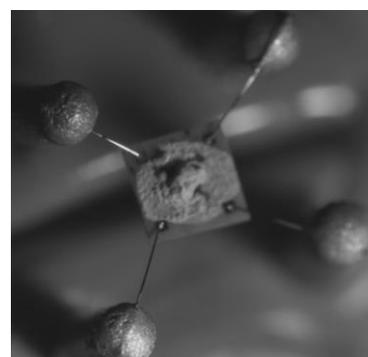


Рисунок 1 – Фотографическое изображение сенсора на кремниевой подложке

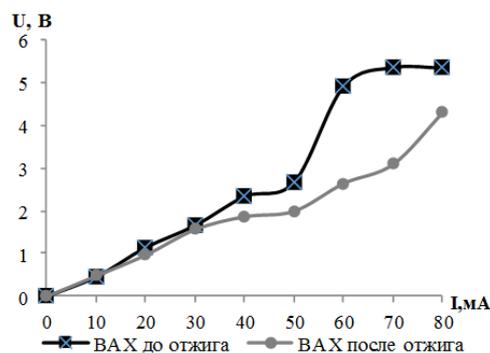


Рисунок 2 – Вольтамперные характеристики сенсора на кремниевой подложке

Как показано на рисунке 2 измерение вольтамперных характеристик проводилось до длительного отжига и после него. Время отжига составило 48 часов. В результате данного процесса наблюдается уменьшение потребляемой мощности и стабилизация характеристик сенсора.

Длительные термоэлектрические отжижки позволяют уменьшить временной «дрейф» сигнала сенсорного устройства, а также проводить измерения сенсорного отклика при мощности потребления от 1 мВт до 500 мВт.