

ДИАГНОСТИКА КРИЗИСНОГО СОСТОЯНИЯ РЕАКТОРА ВВЭР НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ЗАПАРИВАНИЯ КАНАЛА

С.А. Качур

*Севастопольский государственный университет
299053, Севастополь, ул. Университетская, 33*

Р

Цель исследования – создание модели прогнозирования процесса кризисного состояния запаривания канала активной зоны реактора ВВЭР. Модель описывает динамику поведения ядерного реактора в условиях неопределенности, которые характерны для нештатных ситуаций, на основе информации о процессе теплообмена в технологических каналах активной зоны.

Применение предложенной модели приводит к повышению быстродействия за счет упрощения процедуры расчета параметров процесса теплообмена в активной зоне реактора. Повышение качества оценки состояния реактора происходит за счет прогнозирования параметров процесса теплообмена и определения значения параметров кризиса теплообмена в активной зоне до начала поверхностного кипения, возможность которого не диагностируется в современных системах внутриреакторного контроля ВВЭР.

Предложена модификация математической модели, позволяющая наиболее просто использовать достоинства нейронных сетей при диагностике. Модель может быть использована при разработке систем диагностики внутриреакторных аномалий и систем адаптивного управления тепловой мощностью ядерного реактора типа ВВЭР.

Ключевые слова: ядерный реактор, кризис теплообмена, энерговыделение, теплофизическая модель, идентификация, нейронные сети.

ВВЕДЕНИЕ

Активные зоны реакторов крупных АЭС имеют сложные структуры с большим количеством тепловыделяющих сборок и регулирующих органов, работающих в напряженных условиях. Для решения задачи оптимизации энерговыделения в таких активных зонах и повышения экономичности работы АЭС потребовалась разработка специальных средств и устройств автоматики, обеспечивающих контроль и управление ядерными реакторами [1].

В общем случае необходимые сигналы и уставки срабатывания аварийной защиты (АЗ) обосновываются расчетными и экспериментальными исследованиями и зависят от типа реактора. Часто параметры, определяющие безопасность реакторной установки (температуры топлива и оболочек, положение наиболее «горячей» точки, место закипания и т.д.), невозможно прямо измерить. В этом случае необходимо на основании физических и теплотехнических расчетов определить безопасные области изменения измеряемых параметров, а также уставки АЗ для каждого из них.

© С.А. Качур, 2019

Описание функционирования ядерной энергетической установки (ЯЭУ) при локальных возмущениях как случайного процесса, основными показателями которого в режиме предельных тепловых нагрузок являются параметры поверхностного кипения, а именно, давление теплоносителя, температура теплоносителя в камере смешения, среднее объемное паросодержание [1 – 3], позволяет использовать в качестве основы адаптивных систем управления стохастические модели.

С одной стороны, существует необходимость в создании простых и эффективных моделей процесса теплообмена в технологическом канале реакторов, позволяющих на основании небольшого количества параметров делать заключение о нарушении теплообмена на ранних стадиях. С другой стороны, необходима разработка быстродействующих адаптивных систем управления, модели которых учитывали бы стохастический характер процесса теплообмена.

Механизмы кризиса теплообмена в каналах в значительной мере определяются режимами течения двухфазной смеси, недогревом жидкости до температуры насыщения и плотностью теплового потока [3]. Интерпретация опытных данных и форма описания их эмпирическими зависимостями вызывают определенные трудности. Традиционным является представление экспериментальных данных в координатах $q_{кр}(x_{кр})$ ($q_{кр}$ – критическая плотность теплового потока, $x_{кр}$ – критическое массовое паросодержание), при котором необходимо $x_{кр}$ вычислить из уравнения теплового баланса, что сопряжено с дополнительными ошибками. Кроме того, задача нетерминального адаптивного управления тепловой мощностью ядерного реактора по квадратичному критерию предполагает наличие прогнозируемого вектора состояния системы (вектора тепловой мощности каналов активной зоны), который невозможно получить на основании существующих теплофизических и термодинамических моделей.

Большое количество работ [4 – 16] свидетельствует об актуальности проблемы идентификации кризиса теплообмена первого рода на поверхности тепловыделяющего элемента реактора типа ВВЭР. Кризис первого рода обусловлен переходом пузырькового кипения в пленочное, которое имеет место при высоких удельных тепловых потоках.

В последнее время усилился интерес к использованию возможностей нейронных сетей при контроле и управлении ЯЭУ [17, 18]. Это требует создание моделей, которые можно адаптировать к математическому аппарату нейронных сетей [19, 20].

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕНДЕНЦИИ ЗАПАРИВАНИЯ КАНАЛА В АКТИВНОЙ ЗОНЕ

Задача разработки математической модели тепловыделения в ядерном реакторе включает в себя

- построение диаграммы состояния реактора на основании термодинамических характеристик, экспериментальных зависимостей и текущих измерений основных параметров;
- прогнозирование изменения параметров и расчет их критических значений;
- возможность прогнозирования нарушения теплообмена на стадии начала поверхностного кипения и (или) при резком изменении основных параметров процесса теплообмена [8].

По результатам анализа моделей кризисных явлений при кипении в двухфазном потоке для проведения исследования процесса теплообмена в активной зоне реактора были выбраны эмпирическая модель определения массового парообразования для разных стадий кипения по результатам З.Л. Миропольского и эмпирические исследования поверхностного кипения в канале исследовательского ядерного реактора ИР-100 (рис. 1) [9].

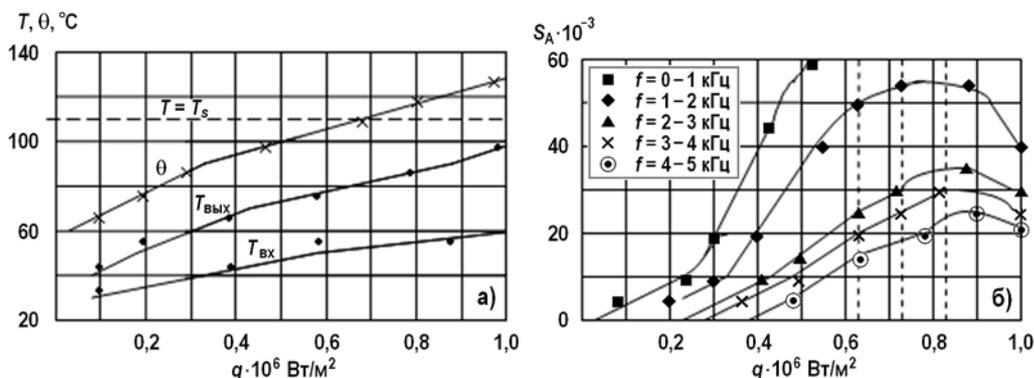


Рис. 1. Экспериментальные данные, характеризующие температурный режим канала (а) и акустические спектральные характеристики (б)

Модель реактора можно представить как интегрированную модель отдельных ТВС. Предположим, что для диагностики и прогнозирования состояния процесса теплообмена в активной зоне ядерного реактора достаточно знать следующие параметры текущего процесса в каждом канале:

- температуру теплоносителя на выходе канала T ;
- давление в первом контуре P ;
- температуру стенки твэла θ в верхней части канала;
- удельную плотность теплового потока q ;
- температурные характеристики (рис. 1а) до начала кипения;
- акустические спектральные характеристики (рис. 1б).

В качестве основы модели выберем T - s -диаграмму [10] как наиболее полно отражающую термодинамический процесс преобразования энергии.

Первый этап построения модели – анализ взаимосвязи между удельной энтропией s системы и экспериментальными акустическими спектральными характеристиками. Из рисунка 1 видно, что в диапазоне частот $f = 2 - 5 \text{ кГц}$ до начала поверхностного кипения ($q \leq 0,6 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2$) при соответствующем нормировании все характеристики имеют один наклон, определяющий значение коэффициента

$$B = \Delta q \cdot k_{\text{норм}} / \Delta A = \Delta q / \Delta T, \quad (1)$$

где ΔA – изменение амплитуды спектральной плотности флуктуации акустического шума при изменении удельной плотности теплового потока Δq ; ΔT – изменение температуры теплоносителя на выходе канала при изменении Δq ; $k_{\text{норм}}$ – коэффициент нормирования, зависящий от конструктивных особенностей конкретного реактора.

Из уравнения теплового баланса с учетом (1) и предположения, что $\Delta G/G = \Delta \alpha / (1 - \alpha)$ [11], после простых преобразований можно получить соотношения

$$\begin{aligned} \Delta q &= C \cdot G \cdot \Delta T \rightarrow \Delta q / \Delta T = C \cdot G \equiv B, \\ \Delta q &= \Delta G \cdot C \cdot T \rightarrow \Delta q / T = \Delta G \cdot C = (\Delta G/G) \cdot G \cdot C = \Delta \alpha / (1 - \alpha) \cdot B, \end{aligned} \quad (2)$$

где q – удельная плотность теплового потока; T – температура теплоносителя на выходе канала; G – массовый расход теплоносителя; C – удельная теплоемкость; α – объемное паросодержание; $\Delta \alpha$ – изменение объемного паросодержания, вызывающее изменение массового расхода теплоносителя ΔG .

Изменение удельной энтропии Δs определяется с учетом (2) следующим образом:

$$\Delta s = \Delta q / T = \Delta \alpha / (1 - \alpha) \cdot B. \quad (3)$$

Из соотношения (3) следует, что максимальное изменение удельной энтропии до-

стигается при условии $\Delta\alpha/(1 - \alpha) = 1$ и имеет величину $\Delta s_{\max} = B$.

Второй этап – определение температуры $T_{\text{нк}}$ начала поверхностного кипения. Анализируя рис. 1а и учитывая функциональную зависимость температуры кипения от давления $T_s = f(P)$, получаем

$$T_{\text{нк}} = T \text{ при } \theta = T_s. \quad (4)$$

Третий этап – построение рабочей прямой на T - s -диаграмме. Рабочая прямая определяется точками начала кипения (точка A , рис. 2) и перехода в состояние перенасыщенного пара (точка D , рис. 2). Точка A определяется пересечением кривой равновесия фаз T - s -диаграммы с прямой $T = T_{\text{нк}}$, а точка D – пересечением кривой равновесия фаз T - s -диаграммы с прямой $s = s_{\text{нк}} + B$. При отсутствии внешних воздействий изменение параметров процесса теплообмена соответствует движению по рабочей прямой.

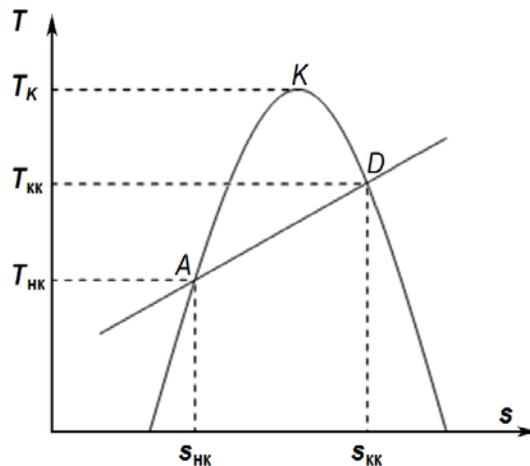


Рис. 2. Построение рабочей прямой на T - s -диаграмме

Уравнение рабочей прямой имеет вид

$$T(s) = (s - s_{\text{нк}})(T_{\text{кк}} - T_{\text{нк}})/(s_{\text{кк}} - s_{\text{нк}}) + T_{\text{нк}}. \quad (5)$$

Четвертый этап – прогнозирование объемного паросодержания при поверхностном кипении ($T_{\text{нк}} < T < T_s$) в случае изменения температуры теплоносителя на ΔT . По уравнению прямой (5) для $T = T_{\text{нк}} + \Delta T$ определяем $\Delta s = s - s_{\text{нк}}$. После несложных преобразований (4) и (5), принимая $\Delta\alpha = \alpha - \alpha_{\text{нк}}$, величина α вычисляется по формуле

$$\alpha = (\alpha_{\text{нк}} + \Delta s/B) / (1 + \Delta s/B). \quad (6)$$

Значение $\alpha_{\text{нк}}$ определяется в соответствии с формулой

$$\alpha_{\text{нк}} = 1,17q^{0,35} / P^{0,15}(\rho w)^{0,15}, \quad (7)$$

где ρw – массовая скорость [3].

Пятый этап – прогнозирование массового паросодержания в случае изменения температуры теплоносителя на ΔT . Используя соотношения для области поверхностного кипения ($x_0 < x < 0$, $T_{\text{нк}} < T < T_s$) в соответствии с [2],

$$\alpha = \alpha_{\text{нк}} (1 - x/x_{\text{нк}})^{1,35}, \quad (8)$$

$$x_{\text{нк}} = -0,573q^{0,7}(P/(\rho w))^{0,3}, \quad (9)$$

после несложных преобразований получим

$$x = x_{\text{нк}}(1 - \alpha^{0,74}/\alpha_{\text{нк}}). \quad (10)$$

Шестой этап – прогнозирование удельной плотности теплового потока $q_{\text{прог}}$ при поверхностном кипении ($T_{\text{нк}} < T < T_s$) в случае изменения температуры теплоносителя на ΔT . На основании текущей информации о значении q и T по рабочей прямой на T - s -диаграмме определяем $\Delta q = \Delta s(T + \Delta T)$ и рассчитываем прогнозное значение

$$q_{\text{прог}} = q + \Delta s(T + \Delta T). \quad (11)$$

Представленная методика построения модели предусматривает монотонное изменение параметров.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КРИЗИСА ТЕПЛООБМЕНА ПО МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Изменения положения рабочей прямой для точки P при наличии случайных внешних воздействий, способных привести к кризису теплообмена, следующие:

- резкое понижение давления в первом контуре;
- резкое повышение температуры (ΔT);
- резкое повышение давления (ΔP) и мощности (ΔQ).

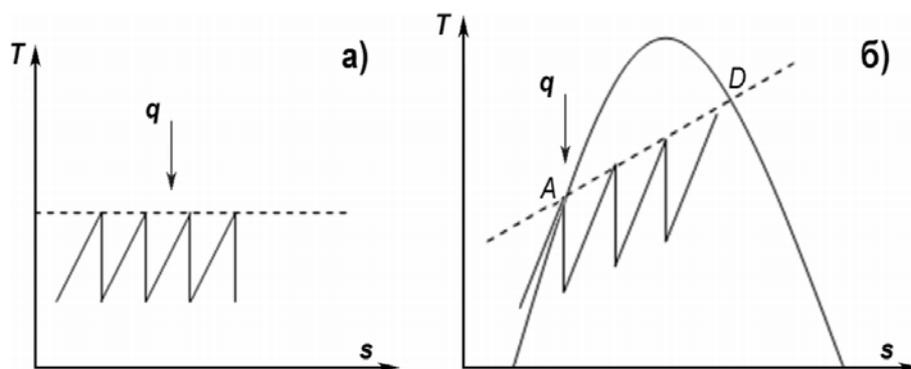


Рис. 3. Термодинамический процесс подвода тепла для теплового двигателя или ядерного реактора в проектном режиме (а) и ядерного реактора в нештатных ситуациях (б)

Физический смысл рабочей прямой на T - s -диаграмме может быть определен следующим образом. Для газов процесс подвода теплоты может быть приближен к изотермическому, если он будет состоять из чередующихся процессов изобарического подвода тепла с последующим адиабатическим расширением в небольшом интервале давлений (рис. 3а) [9]. Чем больше таких ступеней и чем меньше расширение в каждой из ступеней, тем ближе кривая процесса, представляющая собой пилообразную линию, к изотерме. Для активной зоны реактора в случае неконтролируемого подвода тепла (при несвоевременном отводе пара и газов) в нештатных ситуациях процесс может быть представлен рис. 3б.

В соответствии с рабочей прямой AD (рис. 4) точка K , определяющая критическую температуру, смещается в точку K' с координатами $s'_{K'} = s_{\text{нк}} + \Delta s_{\text{max}}/2$ ($\Delta s_{\text{max}} = B$) и $T'_{K'}$. Для нахождения точки кризиса C , определяющей критическую плотность теплового потока $q_{\text{кр}}$, выделим два класса состояний активной зоны реактора в случае возникновения поверхностного кипения:

- кризис теплообмена отсутствует;
- наличие кризиса теплообмена.

В качестве параметра состояния системы примем энтропию.

В предположении, что распределение внутри классов показателя s описывается нормальным законом с математическим ожиданием $s_{\text{нк}}$ для первого и $s'_{K'}$ для второ-

го класса и одинаковой дисперсией σ^2 , на рис. 5 представлены функции плотности распределения энтропии для этих классов. Точка $s_{кр}$ пересечения функций плотности распределения соответствует энтропии системы в состоянии, для которого вероятности кризиса теплообмена и его отсутствия равны, т.е. определяет $q_{кр}$.

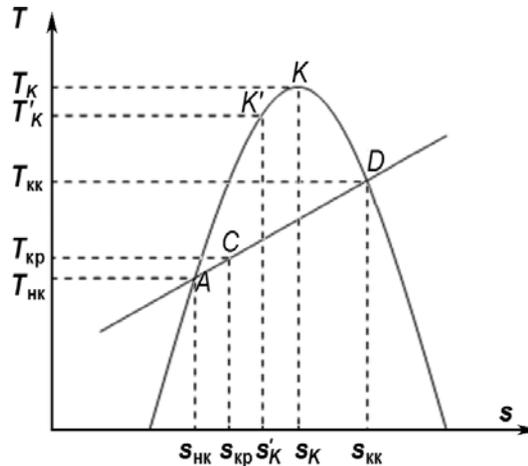


Рис. 4. Построение точки кризиса C на рабочей прямой T - s -диаграммы

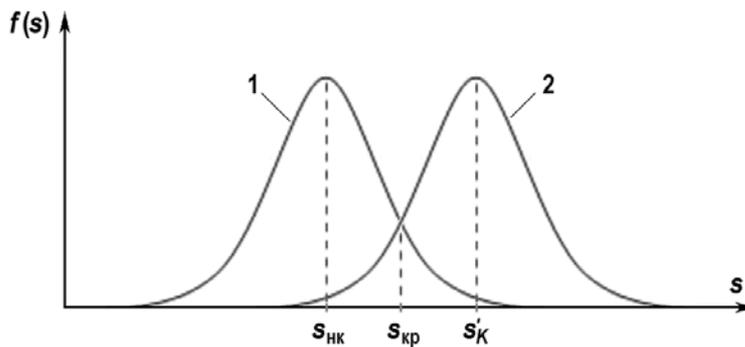


Рис. 5. Функции плотности распределения энтропии для двух классов ситуаций: 1 – кризис теплообмена отсутствует; 2 – наличие кризиса теплообмена

Координаты точки $C(s_{кр}, T_{кр})$ на рабочей прямой (см. рис. 4), где

$$s_{кр} = (s_{НК} + s'_{к})/2 = s_{НК} + B/4, \quad (12)$$

$\Delta s = B/4$, $q = q_{НК}$, $\Delta T = T_{кр} - T_{НК}$, позволяют рассчитать $\alpha_{кр}$, $x_{кр}$, $q_{кр}$ по формулам (6), (10), (11).

Предложенная модель позволяет значительно упростить расчет такого параметра, как массовое паросодержание, заменив итерационный алгоритм его расчета последовательностью нескольких формул. Причем построение исходной рабочей прямой производится с достаточным запасом времени до начала кипения и возникновения необходимости производить контроль параметров процесса поверхностного кипения.

ЭКСПРЕСС-ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ ЗАПАРИВАНИЯ КАНАЛА

В процессе построения математической модели предполагалось, что поверхностное кипение уже имеет место, поскольку температура стенки твэла достигла температуры кипения теплоносителя. Поэтому температура начала кипения соответствует температуре теплоносителя на выходе канала при появлении поверхностного кипения. В [8] определение температуры кипения производилось через расчет мас-

сового паросодержания, определялась точка пересечения теоретической и экспериментальной зависимостей.

На начальном этапе течение теплоносителя имеет конвективный характер. Необходимо осуществить прогноз температуры начала кипения и построить на основе этого прогноза уравнение рабочей прямой (5). Переход от конвективной фазы к поверхностному кипению возможен в случае, когда процесс изменения мощности происходит с ускорением.

Максимальный угол наклона β рабочей прямой будет определяться вторыми разностями энтропии при $\Delta s = B$:

$$\Delta T / \Delta^2 s = \Delta T^2 / \Delta^2 q = \operatorname{tg} \beta, \quad (13)$$

где $\Delta^2 q$ – вторая разность q .

Предположим, что T - s -диаграмма описывается функцией F_{Ts} . Поскольку расстояние между точками пересечения рабочей прямой с кривой равновесия фаз T - s -диаграммы соответствует B , то точку начала кипения можно определить из соотношений

$$F_{Ts}(s_{\text{нк}} + B) - F_{Ts}(s_{\text{нк}}) = B \cdot \operatorname{tg} \beta, \quad (14)$$

$$T_{\text{нк}} = F_{Ts}(s_{\text{нк}}). \quad (15)$$

В случае задания F_{Ts} в табличном виде поиск координат точки кипения осуществляется простым перебором до выполнения с заданной погрешностью условия (14). Определение остальных параметров производится в соответствии с предложенной математической моделью.

Для быстрой идентификации состояния канала предлагается использовать нейронную сеть с одним персептроном. Значение $s_{\text{кр}}$, вычисленное по формуле (12), разбивает рабочую прямую на две части, на два подмножества точек. Выполнив обучение персептрона таким образом, что нулевому классу будут соответствовать значения точек на рабочей прямой до $s_{\text{кр}}$, а первому классу – после $s_{\text{кр}}$, можно осуществить классификацию заданного вектора значений (s, T) в один из двух классов. По результатам классификации выдается сообщение о соответствии текущего состояния канала требованиям.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная математическая модель позволяет повысить безопасность функционирования такой сложной системы, как атомный реактор, определив в качестве одного из главных проявлений его функционирования процесс кипения. Модель дает возможность своевременно идентифицировать и прогнозировать аварийную ситуацию, связанную с ухудшением теплообмена с ТВЭЛов, за счет использования прямых измерений параметров теплообмена, минимизации косвенных расчетов и применения эмпирических формул. Модель расширяет класс решаемых задач, т.е. позволяет перейти от задачи идентификации параметров и состояния ядерного реактора к задаче прогнозирования кризиса теплообмена.

Рассмотрена возможность быстрой диагностики состояния канала с применением нейросетевых технологий.

Литература

1. Емельянов И.Я., Ефанов А.И., Константинов Л.В. Научно-технические основы управления ядерными реакторами. – М.: Энергоиздат, 1981. – 360 с.
2. Емельянов И.Я., Гаврилов П.А., Селиверстов Б.Н. Управление и безопасность ядерных энергетических установок – М.: Атомиздат, 1975. – 280 с.
3. Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С., Бобков В.П. Справочник по теплогидравлическим расчетам. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 360 с.
4. Брагин В.А., Батенин И.В., Голованов М.Н. Системы внутриреакторного контроля АЭС с

- реакторами ВВЭР – М.: Энергоиздат, 1987. – 128 с.
5. *Шараевский И.Г., Домашнев Е.Д., Архипов А.П.* Метод верификации начала вскипания теплоносителя в каналах ядерного реактора. // Промышленная теплотехника. – 2001. – Т. 23, № 4-5. – С. 114-121.
 6. *Шараевский И.Г.* Распознавание режимов течения двухфазного потока в каналах ядерного реактора по шумам технологических параметров. // Промышленная теплотехника. – 2000. – Т. 22. – № 1. – С. 53-59.
 7. *Ковецкая М.М.* Кризис теплообмена в пучках стержней с закруткой потока. // Промышленная теплотехника. – 2009. – Т. 31. – № 5. – С. 50-55.
 8. *Качур С.А.* Прогнозирующая графоаналитическая модель процесса поверхностного кипения в активной зоне ВВЭР. // Сб. науч. тр. СНУЯЭиП. – 2009. – Вып. 2 (30). – С. 18-25.
 9. *Попов И. А, Качур С. А.* Идентификация процесса поверхностного кипения теплоносителя в активной зоне АЭУ с ВВЭР. // Сб. науч. тр. СНУЯЭиП. – 2009. – Вып. 4 (32). – С. 68-76.
 10. *Новиков И.И., Воскресенский К.Д.* Прикладная термодинамика и теплопередача – М.: Атомиздат, 1977. – 352 с.
 11. *Крамер Э.У.* Ядерные реакторы с кипящей водой. – М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1960. – 509 с.
 12. *Герлига В.А., Скалзуб В.И.* Пузырьковые кипящие потоки в энергооборудовании АЭС. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 520с.
 13. *Долинский А.А., Шараевский И.Г., Фиалко Н.М.* Методология распознавания и верификации кризисов теплоотдачи в стержневых сборках. // Промышленная теплотехника. – 2005. – Т. 27. – № 6. – С. 66-80.
 14. *Попов И.А. Домашев Е.Д., Сычев Е.Н., Журавлев А.А.* Экспериментальная установка и автоматизированная система сбора и обработки информации для моделирования аварийных теплогидравлических процессов. // Промышленная теплотехника. – 2007. – Т. 29. – № 2. – С. 62-68.
 15. *Леонтьев А.И., Олимпиев В.В.* Влияние интенсификации теплообмена на тепло гидравлические свойства каналов. // Теплофизика высоких температур. – 2007. – Т. 45. – № 6. – С. 925-953.
 16. *Кириллов П.Л.* Новое о методах интенсификации теплообмена поверхности с кипящей водой. // Атомная техника за рубежом. – 2005. – № 10. – С. 3-7.
 17. *Шапалова С.И., Шараевский Г.И.* Среда моделирования нейронных сетей для решения задач диагностики оборудования АЭС. // Проблемы программирования. – 2008. – № 2-3. – С. 675-678.
 18. *Качур С.А., Богма А.С.* Модификация автоматических систем регулирования на основе статистических и нейросетевых методов. // Энергетические установки и технологии. – 2018. – Т. 4. – № 1. – С. 50-55.
 19. *Уоссерман Ф.* Нейрокомпьютерная техника: теория и практика. – М.: Мир, 1992. – 237 с.
 20. *Хайкин С.* Нейронные сети: полный курс. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. – 1104 с.

Поступила в редакцию 24.05.2018 г.

Автор

Качур Светлана Александровна, профессор, д-р техн. наук
E-mail: kachur_62@mail.ru

UDC 621.039.56

DIAGNOSTICS OF THE CRISIS STATE OF THE PWR REACTOR ON THE BASIS OF MODEL OF STEAMING OF CHANNEL

Kachur S.A.

Sevastopol State University
33 University str., Sevastopol, 299053 Russia

ABSTRACT

The offered mathematical model allows to promote safety of functioning of the such difficult system, as atomic reactor, defining a boiling process as one of above all displays of his functioning. A model enables in good time to forecast, localize and remove the emergency situation related to worsening of taking warm, due to the use of the direct measurings of parameters of heat exchange, minimization of indirect calculations and application of empiric formulas. The offered model extends the class of the decided tasks, I.e. it allows to pass from the task of authentication of parameters and state of nuclear reactor to the task of prognostication of crisis of heat exchange.

The offered way of providing of safe management allows to use all present hardwares of control and the reactor management and does not require additional material expenses for the reconstruction of the systems. Application of forecasting mathematical model enables to shorten time on the decision-making, expose the crisis of heat exchange on an early stage, which is not fixed by other control and control systems. It allows to prevent crisis situations without the use shield, application of which worsens the operating parameters of the reactor setting from appearance of transitional processes and poisoning of reactor by xenon.

The analysis of existent models and methods of diagnostics of nuclear reactor showed that their basic task consisted in authentication of current status of reactor on the basis of information by acting one from sensors, determination of possible limits of basic parameters, authentications of current situations. The functions of prognosis, as such, are absent.

It is possible to define the following ways of modification of the existent intrareactor control systems: 1) prognostication of intrareactor anomalies; 2) prognostication of the state of reactor and crisis situations; 3) transmission of functions of operator to the intellect systems.

Possibility of rapid diagnostics of the state of channel with the use of neuronet technologies is considered.

A model can be used for development of the systems of diagnostics of intrareactor anomalies and adaptive control systems by thermal power of nuclear reactor of the type PWR.

Key words: nuclear reactor, crisis of heat exchange, energy-release, thermalphysic model, identification, neural nets.

REFERENCES

1. Emelyanov I.Ya., Efanov A.I., Konstantsnov L.V. *Scientific and Technical Control Bases by Nuclear Reactors*. Moscow. Energoizdat Publ., 1981, 360 p. (in Russian).
2. Emel'yanov I.Ya., Gavrilov P.A., Seliverstov B.N. *Control and Safety of Nuclear Power Reactors*. Moscow. Atomizdat Publ., 1975, 280 p. (in Russian).
3. Kirillov P.L., Yur'ev Yu.S., Bobkov V.P. *Reference Book Upon Heat-hydraulic Accounts*. Moscow. Energoizdat Publ., 1990, 360 p. (in Russian).
4. Bragin V.A., Batenin I.V., Golovanov M.N. *Systems into the Reactor Control of APP with the PWR Reactors*. Moscow. Energoizdat Publ., 1987, 128 p. (in Russian).

5. Sharoevskij I.G., Domashev E.D., Arhipova A.P. Method of verification of beginning of boiling up of coolant in the channels of nuclear reactor. *Promyshlennaya teplotekhnika*, 2001, v. 23, no 4-5, pp. 114-121 (in Russian).
6. Sharoevskij I.G. Recognition of the modes of flow of diphasic stream in the channels of nuclear reactor on noises of technological parameters. *Promyshlennaya teplotekhnika*, 2000, v. 22, no 1, pp. 53-59 (in Russian).
7. Kovetskaya M.M. Crisis of heat exchange in the bunches of bars with twirling of stream. *Promyshlennaya teplotekhnika*, 2009, v. 31, no. 5, pp. 50-55 (in Russian).
8. Kachur S.A. Forecasting graphic-analytical model of process of the superficial boiling in the active zone. PWR. *Sbornik nauchnykh trudov SNUYaEiP*, 2009, no. 2 (30), pp. 18-25 (in Russian).
9. Popov I.A., Kachur S.A. Identification of process of the superficial boiling of coolant in the active zone APP with PWR. *Sbornik nauchnykh trudov SNUYaEiP*, 2009, no. 4(32), pp. 68-76 (in Russian).
10. Novikov I.I., Voskresenskij K.D. *Applied Thermodynamics and Heat*. Moscow. Atomizdat Publ., 1977, 352 p. (in Russian).
11. Kramer E. Y. *Nuclear Reactors with Boiling Water*. Moscow. Izdatel'stvo inostrannoy literatury Publ., 1960, 509 p. (in Russian).
12. Gerliga V.A., Skalozub V.I. *Nucleate Boiling Flows in Nuclear Power Plant Power Equipment*. Moscow. Energoizdat Publ., 1992, 520 p. (in Russian).
13. Dolinskij A.A., Sharaevskij I.G., Fialko N.M. The methodology for the recognition and verification of the crisis of heat transfer in rod assemblies. *Promyshlennaya teplotekhnika*, 2005, v. 27, no. 6, pp. 66-80 (in Russian).
14. Popov I.A., Domashev E.D., Sychev E.N., Zhuravlev A.A. Experimental setup and automated system of data collection and processing for simulation of emergency thermal-hydraulic processes. *Promyshlennaya teplotekhnika*, 2007, v. 29, no. 2, pp. 62-68 (in Russian).
15. Leont'ev A.I., Olimp'ev V.V. The influence of intensification of heat transfer on the thermohydraulic properties of channels. *Teplofizika vysokikh temperatur*, 2007, v. 45, no. 6, pp. 925-953 (in Russian).
16. Kirillov P.L. New methods of intensification of surface heat exchange with boiling water. *Atomnaya tehnika za rubezhom*, 2005, no. 10, pp. 3-7 (in Russian).
17. Shapovalova S.I., Sharoevskij G.I. Environment of design of neuron nets for the decision of tasks of diagnostics of equipment of APP. *Problemy programirovaniya*, 2008, no. 2-3, pp. 675-678 (in Russian).
18. Kachur S.A., Bogma A.S.. Modification of automatic control systems based on statistical and neural network methods. *Energeticheskie ustanovki i tekhnologii*. 2018, v. 4, no. 1, pp. 50-55 (in Russian).
19. Uosserman F. *Neurocomputer Technique: Theory and Practice*. Moscow, Mir, 1992, 237 p. (in Russian).
20. Hajkin S. *Neural Nets: Complete Course*. Moscow. Izdatel'skij dom «Vil'yams» Publ., 2006, 1104 p. (in Russian).

Author

Kachur Svetlana Aleksandrovna, Professor, Dr. Sci. (Engineering)
E-mail: kachur_62@mail.ru