

РАСПОЗНАВАНИЕ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ АНОМАЛИЙ В РЕАКТОРЕ ВВЭР ПО СПЕКТРАЛЬНЫМ ПАРАМЕТРАМ РЕАКТОРНЫХ ШУМОВ

И. Г. Шараевский

Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Киев

Представлены подходы к распознаванию начала устойчивой генерации паровой фазы в реакторе ВВЭР на основе статистической и геометрической моделей.

В комплексной проблеме обеспечения надежности активных зон (АкЗ) водоохлаждаемых ядерных реакторов важное место занимает актуальная в настоящее время [1, 2] задача разработки эффективных методов автоматического распознавания теплогидравлических аномалий АкЗ, представляющих собой угрозу безопасности.

Возможность неконтролируемого перехода теплогидравлических режимов в реакторных установках водо-водяного типа от конвекции сначала к пузырьковому кипению на поверхности ТВЭЛ, а затем и к кризису теплоотдачи первого рода вынуждает принимать меры к подавлению кипения, несмотря на высокие значения коэффициента теплоотдачи в тепловыделяющих сборках (ТВС), которыми оно характеризуется. Это обуславливает необходимость обнаружения различных стадий кипения в любой точке АкЗ. Согласно [2], придание штатным системам внутрореакторного контроля (СВРК) таких интеллектуальных функций, как распознавание структурных форм двухфазного потока в ТВС, является определяющим условием безопасности реакторов ВВЭР. Применительно к условиям их эксплуатации указанная задача формулируется как автоматическое распознавание пузырькового кипения в АкЗ по шумам технологических параметров.

В соответствии со сложившейся практикой определение границ основных видов структурных форм двухфазного потока в парогенерирующих каналах ТВС со сложной формой теплоотдающей поверхности выполняется на основе эмпирических зависимостей и сформированных на их основе карт режимов течения. Трудности такого определения имеют объективный характер. В реальных условиях АкЗ ядерных реакторов известные экспериментальные методы определения режимов течения двухфазных потоков [3, 4] не могут быть использованы. Указанные проблемы обусловлены вероятностным характером границ между структурными формами двухфазного потока, а также физической нечеткостью основных типов этих парожидкостных структур как случайных объектов. Так, например, в настоящее время известны девять основных разновидностей эмпирических формул [3] для расчета нижней границы пузырьковой структуры двухфазного потока в парогенерирующем канале (плотности теплового потока $q_{нк}$, соответствующей началу кипения теплоносителя на поверхности ТВЭЛ). При их создании использовались различные подходы к физической трактовке и постулировались соответствующие условия перехода процесса теплообмена на поверхности ТВЭЛ от конвективной теплоотдачи к устойчивой генерации легкой фазы паровыми пузырями. Условия перехода парогенерирующего канала от однофазного режима течения к пузырьковой структуре двухфазного потока установлены каждым из авторов достаточно произвольно и субъективно. В связи с неоднозначностью физической трактовки $q_{нк}$ как исходного состояния канала при формировании в нем различных типов парожидкостных структур этому режиму в известных работах достаточно условно ставятся в соответствие различные участки графика функции $T_{ст} = f(q)$ в окрестностях точки $q_{нк}$ [5]. Однако вероятностный характер этого теплогидравлического параметра очевиден. Расхождения в указанных подходах к детерминированному определению на основе эмпирических формул для расчета $q_{нк}$ такого стохастического процесса, как начало генерации паровой фазы, в значительной мере обусловлены отсутствием у экспериментаторов эффективных средств обнаружения момента активации первых центров парообразования [6].

Анализ чувствительности и разрешающей способности различных методов обнаружения начала кипения в парогенерирующих каналах (термометрия, оптическая голография, гамма-сканирование пароводяного потока, его нейтронная диагностика и др.), а также результаты наших исследований, позволяют заключить следующее. Гидроакустические измерительные средства обнаружения $q_{нк}$ в сочетании с эффективными методами распознавания термогидроакустических сигналов на выходе высокотемпературных радиационностойких гидрофонов отличаются чувствительностью, необходимой и достаточной для идентификации момента активации первых центров парообразования. Это имеет определяющее значение, например при обнаружении $q_{нк}$ в ядерных реакторах на быстрых нейтронах. Следует отметить, что начало систематическому исследованию термогидроакустических процессов, сопровождающих основные структурные формы двухфазного потока в парогенерирующих каналах (включая и начало кипения) положено работами [7 - 12].

В качестве иллюстрации высокой чувствительности гидроакустических измерительных средств на рис. 1, *а* представлена осциллограмма гидроакустического сигнала в кольцевом парогенерирующем канале с внутренним электрообогреваемым имитатором ТВЭЛ в момент активации первого центра парообразования, знакопеременные импульсы давления которого накладываются на более низкочастотный шумовой фон циркуляционного насоса. Сопоставление частот спектральных компонент этих сигналов с импульсами давления одиночных паровых пузырей, а также с частотами их генерации в условиях вынужденного движения теплоносителя свидетельствуют о высокой корреляции этих данных [7, 8]. На рис. 1, *б* представлена осциллограмма, соответствующая условиям увеличения плотности теплового потока на поверхности того же ТВЭЛ при переходе к началу устойчивой генерации паровой фазы системой дискретных центров парообразования, (некогерентных излучателей звуковых колебаний) в кипящей жидкости. Суперпозиция отдельных знакопеременных импульсов давления от растущих и деградирующих паровых пузырей формирует стационарный широкополосный шумовой сигнал, характерный для перехода к режиму развитого пузырькового кипения. Сопутствующий экспериментальный контроль температурных режимов теплоотдающей поверхности подтвердил, что все характерные фазы перехода от конвективной теплоотдачи к режиму пузырькового кипения однозначно характеризуются параметрами автоспектральной плотности (АСП) гидроакустического сигнала в кипящей жидкости [7, 9]. Высокая значимость спектральных признаков гидроакустических сигналов в потоке кипящего теплоносителя сохраняется также и в условиях гидродинамической кавитации на элементах циркуляционного контура [1], а также при значениях режимных параметров процесса (в первую очередь, давления), характерных для условий эксплуатации ТВЭЛ в реакторах некипящего и кипящего типов. С ростом давления теплоносителя спектральный диапазон гидроакустического сигнала смещается в существенно более низкочастотную область.

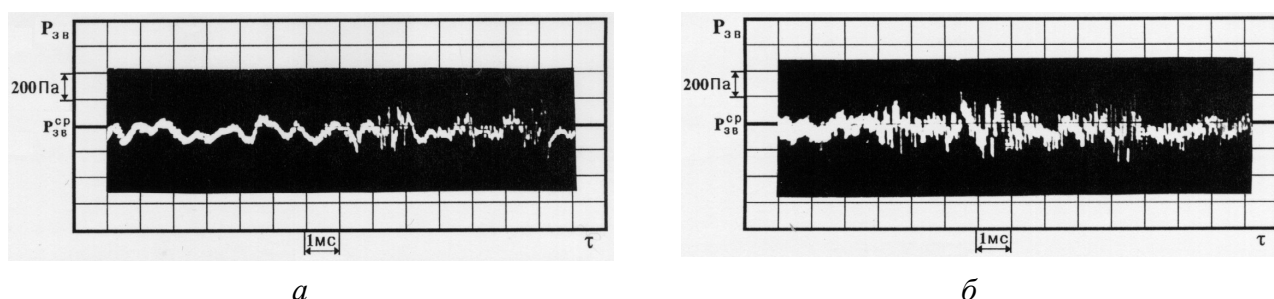
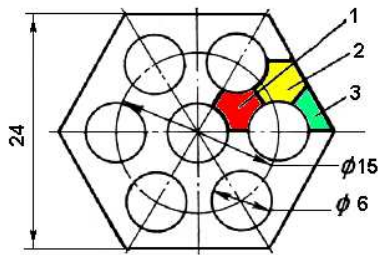


Рис. 1. Данные акустической диагностики режима начала кипения воды (параметры процесса: давление $P = 0,098$ МПа, массовая скорость $w = 1000$ кг/(м²·с), выходной недогрев $\Delta T_{нед}^{вых} = 64$ К) в кольцевом парогенерирующем канале с диаметрами $D = (24 \cdot 14) \cdot 10^{-3}$ м и с внутренним электрообогреваемым имитатором ТВЭЛ (длина обогрева $l_{об} = 0,12$ м): *а* - осциллограмма сигнала динамического давления в режиме активации первого центра парообразования на поверхности имитатора ТВЭЛ ($q = 0,49$ МВт/м²); *б* - осциллограмма сигнала динамического давления в режиме перехода к началу генерации паровой фазы системой дискретных центров парообразования ($q = 0,52$ МВт/м²).

До настоящего времени комплексная верификация режима начала кипения в пучке стержней с использованием признакового пространства АСП сигналов акустического шума в потоке кипящего теплоносителя [10, 11] в сочетании с компьютерной реализацией алгоритмов статистического распознавания нижней границы пузырьковой структуры двухфазного потока в ТВС [12] и с одновременным анализом распределения теплогидравлических параметров по характерным ячейкам стержневой сборки не выполнялась. Однако такие данные необходимы, поскольку в современных теплогидравлических программах, в частности в программе «Пучок 2» [13], учитывается возможность раздельного закипания жидкости в различных ячейках пучка. Ввиду отсутствия расчетных соотношений для ячеек пучков стержней без должного обоснования используются произвольно взятые зависимости для труб.

Исследование начала кипения и определение локальных значений параметров потока по ячейкам проведено нами при продольном течении воды в стержневой сборке ТВЭЛ.



Рабочий участок в виде пучка из семи стержней диаметром 6 мм помещался внутри шестигранного вытеснителя размером «под ключ» 24 мм. Равномерный по длине и сечению обогрев пучка осуществлялся на участке 1 м. Сечение канала условно разбивалось на ячейки, из которых выделялись три характерных: центральная 1, боковая 2 и угловая 3 (рис. 2).

Рис. 2. Сечение экспериментального участка. Ячейки: 1 - центральная; 2 - боковая; 3 - угловая.

Методика и техника проведения подобного исследования распределения параметров теплоносителя по сечению пучка рассмотрены ранее в работе [14]. Локальные значения массовой скорости и относительной энтальпии x потока во всех характерных ячейках определялись как до начала кипения при течении однофазного потока, так и после начала кипения при поверхностном кипении недогретой жидкости и течении двухфазного потока.

Начало кипения в канале вызывало резкое перераспределение теплогидравлических параметров в пучке (рис. 3). Так, массовая скорость в самой «горячей» центральной ячейке пучка падала, по-видимому, вследствие того, что кипение в ней начиналось раньше, и ее сечение частично загромождалось паровыми пузырями. Относительная энтальпия в центральной ячейке возрастала, а в угловой падала, что увеличивало перекося поля энтальпии по сечению сборки.

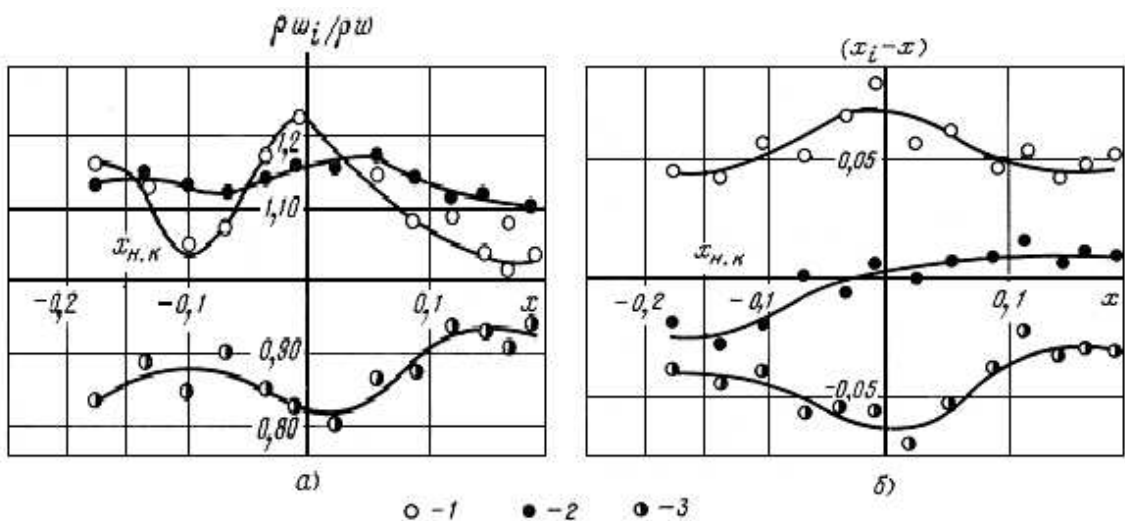


Рис. 3. Изменение относительной массовой скорости (а) и относительной энтальпии (б) теплоносителя в ячейках пучка: $\rho w = 300 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; $p = 14 \text{ МПа}$; $q = 0,3 \text{ МВт}/\text{м}^2$; 1 - 3 - см. на рис. 2.

Фиксация начала кипения в сборке обеспечивалась акустическими измерениями и контролировалась по температурным режимам обогреваемых поверхностей в конце обогреваемой длины пучка. Опыты проводились при массовой скорости в пучке $w = 300 - 2500 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, давлении $p = 6 - 14 \text{ МПа}$, плотности теплового потока, соответствующей началу кипения $q = 0,3 - 2 \text{ МВт}/\text{м}^2$.

Сигналы датчиков динамического давления, установленных в верхней и нижней камерах экспериментальной ТВС, записывались на магнитную ленту измерительного магнитографа Н-046. Зарегистрированные сигналы в режиме воспроизведения подавались на входы цифрового спектроанализатора «Bruel&Kjaer-2133», вычислявшего оценки АСП в 1/3 октавных спектральных полосах в диапазоне частот $\Delta f = 0,1 - 1000,0 \text{ Гц}$, а также спектроанализатора СК4-3 с фотоприставкой. Цифровой выход спектроанализатора соединялся с входным портом персонального компьютера IBM PC с процессором INTEL P II - 600.

Задача идентификации режимов пузырькового кипения в ТВС формулируется как распознавание этих режимов на основе случайных параметров АСП акустического шума, измеренного в верхней камере экспериментальной ТВС. Совокупность распознаваемых теплогидравлических режимов $A_i, i = 1, 2, \dots, M$ образует множество распознаваемых классов $A = \{A_1, A_2, \dots, A_M\}$, каждый элемент которого является определенным типом теплогидравлического режима. В рассматриваемой модели распознавания таких классов теплогидравлических режимов пять: A_1 - конвекция; A_2 - начало кипения; A_3 - развитое пузырьковое кипение; A_4 - режим, непосредственно предшествующий кризису теплоотдачи; A_5 - кризис теплоотдачи, т.е. в рассматриваемой системе обозначений $M = 5$.

Каждое конкретное состояние диагностируемой ТВС характеризуется совокупностью $B_j, j = 1, 2, \dots, T (T \gg M)$ случайных АСП акустического шума и образует подлежащее распознаванию множество $B = \{B_1, B_2, \dots, B_T\}$. Элемент множества B характеризуется совокупностью признаков теплогидравлического режима ТВС, которыми являются параметры АСП акустического шума. Указанная совокупность признаков теплогидравлических режимов образует соответствующее множество $X_N = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$, причем каждая конкретная реализация множества X_N представляется в виде случайного N -мерного вектора. Множество признаков X_N , которыми описываются объекты множества B характеризует N -мерное пространство признаков, в котором объекты классов A занимают некоторые области. При дискретном рассмотрении признаков для каждого из них x_k существует совокупность градаций $l = 1, 2, \dots, R$, которая образует множество $x_k = \{x_{k1}^l, x_{k2}^l, \dots, x_{kR}^l\}$.

Каждый из теплогидравлических режимов $A_i, i = 1, 2, \dots, M$, представленный множеством X_N диагностических признаков, занимает в N -мерном пространстве признаков некоторую область. Описание этой области, отображающей класс (один из диагностируемых теплогидравлических режимов) в пространство признаков, является эталоном K_i класса A_i . Вследствие случайного характера кипения теплоносителя и формирования в ТВС определенного типа теплогидравлического режима A_i , а также вероятностной природы таких диагностических признаков как спектральные компоненты АСП акустического шума в классах A_i , которые образуют пересекающиеся в N -мерном пространстве множества, задача распознавания режимов в прямой постановке сводится к формированию по данным обучающей статистической выборки эталонов K_i всех M -классов, на основе которых распознавание неизвестного объекта осуществляется по правилу

$$\forall j \in \bar{M} : [\bar{x} \in \bar{K}_j \Leftrightarrow \forall i \in \bar{M} \setminus \{j\} : \gamma_j(\bar{X}) > \gamma_i(\bar{X})]. \quad (1)$$

При этом оптимальное решение $\gamma(\bar{x})$ в случае известных априорных вероятностей $P(A_i)$, должно обеспечивать минимальное значение среднего риска

$$\mathbf{R}_\gamma = \int \int_{M \times X} \mathbf{G}[\gamma(\mathbf{x}), \mathbf{A}] \mathbf{F} \left(\bigcup_{k=1}^N x_k | A_i \right) \mathbf{P}(\mathbf{A}) d\mathbf{x} d\mathbf{A}, \quad (2)$$

где $\mathbf{G}[\gamma(\mathbf{x}), \mathbf{A}]$ - функция потерь, учитывающая последствия выбора решения.

Априорная информация, необходимая для формирования эталонов K_i включает: множество распознаваемых классов $A = \{A_1, A_2, \dots, A_M\}$, их априорные вероятности $P(A_i)$, пространство признаков $X_N = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ и условные вероятности значений признаков $P(\bigcup_{k=1}^N x_k | A_i)$, $i = 1, 2, \dots, M$. В результате формируется множество эталонов $K_i \{P(A_i); P(\bigcup_{k=1}^N x_k | A_i)\}$, размещаемых в памяти компьютера. Минимальное значение среднего риска R_γ обеспечивает байесовский классификатор, использование которого целесообразно в случае многократного принятия решения в одинаковых условиях и известных априорных вероятностях классов, которые по условиям решаемой задачи могут считаться равновероятными $P(A_1) = P(A_2) = \dots = P(A_M) = 1/M$. Байесовское решающее правило заключается в принятии для неизвестной реализации решения о принадлежности ее к классу A_i , если выполняется условие

$$\sum_{i=1}^M g_{i,j} P(A_i) F(\bigcup_{k=1}^N x_k | A_i) \leq \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^M g_{i,j} P(A_i) F(\bigcup_{k=1}^N x_k | A_i), \quad (3)$$

где $g_{i,j}$ - элементы матрицы потерь.

Конкретные особенности реализации правила (1) рассмотрены в работе [15].

В качестве примера информационной значимости спектральных параметров АСП акустического шума на рис. 4 представлены результаты синхронной регистрации температурного режима продольно-омываемой стержневой сборки электрообогреваемых имитаторов ТВЭЛ (наружный диаметр $D = 5,82 \cdot 10^{-3}$ м, обогреваемая длина $l = 0,6$ м, тепловой и гидравлический диаметры пучка: $D_T = 4,61 \cdot 10^{-3}$ м, $D_G = 2,39 \cdot 10^{-3}$ м, площадь проходного сечения $S = 0,632 \cdot 10^{-4}$ м²).

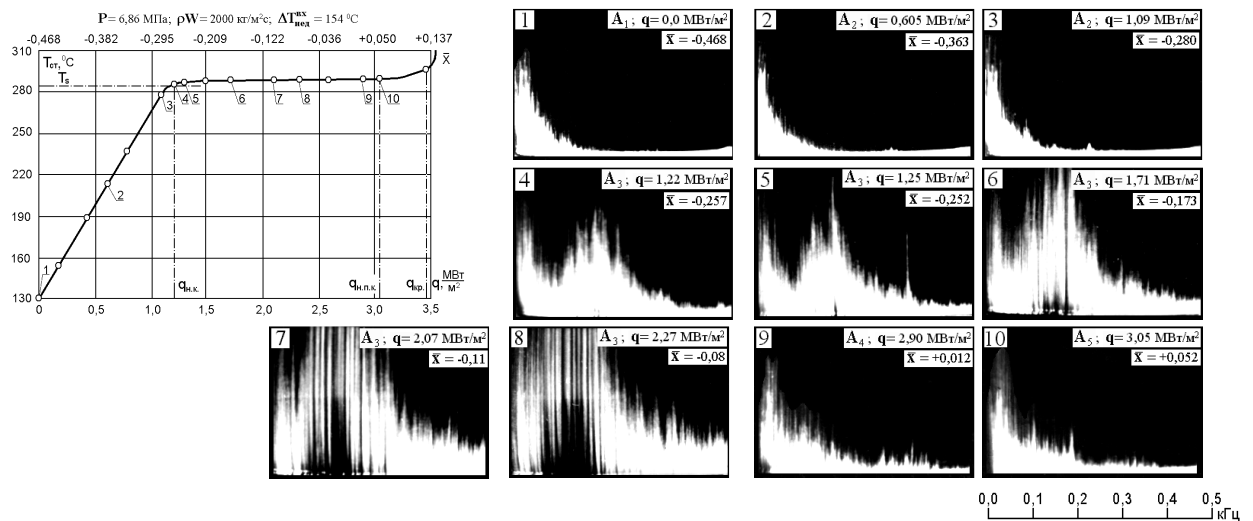


Рис. 4. Результаты синхронной регистрации температуры стенки в выходном сечении трехстержневой сборки ТВЭЛ и АСП акустического шума в теплоносителе (вода) для пяти подлежащих распознаванию теплогидравлических режимов парогенерирующего канала при значениях параметров процесса: $P = 6,86$ МПа, $\rho_w = 2000$ кг/(м²·с), $\Delta T_{\text{нед}}^{\text{блх}} = 154$ °С.

Как следует из представленных на рис. 4 экспериментальных данных, все характерные фазы перехода теплоотдающей поверхности от конвективной теплоотдачи к режиму пузырькового кипения однозначно характеризуются параметрами АСП гидроакустического сигнала в кипящей жидкости.

На рис. 5 представлены АСП акустического шума в режиме начала кипения в электрообогреваемых имитаторах ТВЭЛ, а также в натурном технологическом канале реактора РБМК-1000 энергоблока № 1 Чернобыльской АЭС.

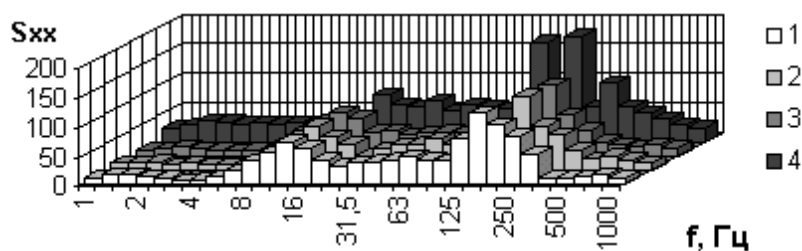


Рис. 5. Сопоставление частотной структуры АСП акустического шума в режиме начала кипения воды (параметры процесса: $P = 6,86$ МПа, $\rho_w = 2450$ кг/(м²·с), $\Delta T^{вык} = 14$ К) в парогенерирующих каналах различной геометрии: 1 – электрообогреваемый цилиндрический канал ($D_{BH} = 8,8 \cdot 10^{-3}$ м, $l_{об} = 2,5$ м); 2 – семистержневая сборка электрообогреваемых имитаторов ТВЭЛ ($D_{НАР} = 6 \cdot 10^{-3}$ м, $l_{об} = 1,0$ м, гидравлический диаметр пучка $5,60 \cdot 10^{-3}$ м, тепловой диаметр пучка $9,13 \cdot 10^{-3}$ м); 3 – трехстержневая сборка электрообогреваемых имитаторов ТВЭЛ ($D_{НАР} = 6 \cdot 10^{-3}$ м, $l_{об} = 0,6$ м, гидравлический диаметр $2,39 \cdot 10^{-3}$ м, тепловой диаметр $4,61 \cdot 10^{-3}$ м); 4 – натуральный технологический канал реактора РБМК-1000 Чернобыльской АЭС.

Ресурсные испытания пьезоэлектрического гидрофона на основе ниобата лития проводились с момента его установки в 1977 году на реакторе РБМК-1000 энергоблока № 1.

В важном частном случае одинаковой стоимости ошибочных решений элементы матрицы потерь $\mathbf{G} = \|\mathbf{g}_{ij}\|$ принимаются равными: $\mathbf{g}_{ij} = 0$ (т.е. при правильной идентификации реализации B_i , которая отнесена к классу A_i , система распознавания потерь не несет) $\mathbf{g}_{ij} = 1$ (т.е. при неправильной идентификации реализации B_i , которая отнесена к любому из остальных классов $A_1, A_2, \dots, A_M, i \neq j$ система распознавания несет равные потери).

Байесовский классификатор основан на вычислении условных апостериорных вероятностей гипотез для всех M классов:

$$\mathbf{P}(A_i | \bigcup_{k=1}^N \mathbf{x}_k) = \frac{\mathbf{P}(A_i) \mathbf{F}(\bigcup_{k=1}^N \mathbf{x}_k | A_i)}{\sum_{i=1}^M \mathbf{P}(A_i) \mathbf{F}(\bigcup_{k=1}^N \mathbf{x}_k | A_i)}. \quad (4)$$

Возможны следующие концептуальные подходы к проблеме минимизации среднего риска (2):

1. Создание байесовского классификатора (4), основанного на теории статистических решений.

2. Использование метода стохастической аппроксимации, основанного на разработке рекуррентных процедур поиска параметра $\gamma(\mathbf{x})$ в (2) для ограниченного класса функций потерь $\mathbf{G}[\gamma(\mathbf{x}), \mathbf{A}]$, обеспечивающих $\min R_\gamma$.

3. Решение задачи минимизации эмпирического риска, основанной на замене неизвестного функционала R_γ функцией эмпирического риска на множестве I случайных векторов-реализаций:

$$\mathbf{R}_{эмп}(\gamma) = \frac{1}{I} \cdot \sum_{i=1}^I \mathbf{G}[\gamma(\mathbf{x}_i)]. \quad (5)$$

В контексте анализа требований, предъявляемых к реализации процедуры обучения распознающей системы, важно, что именно последний из указанных подходов, в отличие от классификатора (4), предусматривающего формирование многомерных распределений вероятностей $\mathbf{P}(\bigcup_{k=1}^N \mathbf{x}_k | A_i)$ как важнейшего компонента статистических эталонов $\bar{\mathbf{K}}_i$, не выдви-

гает серьезных требований к объему исходной априорной статистической информации. С учетом специфики эксплуатации оборудования ЯЭУ, в первую очередь АкЗ ядерных реакторов, получение значительного объема априорной статистики, в особенности, применительно к аварийным режимам эксплуатации ТВС (таким, как кризисы теплоотдачи на поверхности ТВЭЛ) в ряде случаев оказывается затруднительным.

В силу указанного обстоятельства последний из указанных подходов, несмотря на принципиальную возможность идентификации только двух классов образов (например, конвективный режим теплоотдачи на поверхности ТВЭЛ и начало кипения на их поверхности, т.е. $M = 2$), в ряде случаев является предпочтительным. При этом решение задачи о минимизации эмпирического риска (5) предусматривает выполнение следующих основных этапов решения задачи о минимизации риска R_γ :

1. Поиск (на основе выборки случайных векторов распознаваемых классов $\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_l$) параметра $\boldsymbol{\gamma} = \boldsymbol{\gamma}_{\text{опт}}^*$, обеспечивающего $\min \mathbf{R}_{\text{эмп}}(\boldsymbol{\gamma}_{\text{опт}}^*)$.
2. Определение (на основе параметра $\boldsymbol{\gamma} = \boldsymbol{\gamma}_{\text{опт}}^*$) искомой функции $\mathbf{G}[\boldsymbol{\gamma}_{\text{опт}}^*(\mathbf{X})]$.

При этом реализация этапов 1, 2 на основе метода упорядоченной минимизации риска сводится к формированию в \mathbf{N} -мерном признаковом пространстве с априорно заданной обучающей последовательностью из множеств $\mathbf{X}_1 = \mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_a$; $\mathbf{X}_2 = \mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_b$ гиперплоскости Γ , разделяющей выпуклые оболочки \mathbf{X}_1 и \mathbf{X}_2 множества $\mathbf{A}(M = 2)$ так, что $\boldsymbol{\rho} = \max$.

С учетом вышеизложенного математическая модель автоматического распознавания начала кипения в ТВС по параметрам шумов технологических параметров ядерных реакторов (в первую очередь, флуктуаций нейтронного потока в АкЗ) на основе алгоритма формирования оптимальной разделяющей гиперплоскости в многомерном признаковом пространстве формулируется следующим образом.

Два конечных множества векторов $\mathbf{X} = \mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_a$ и $\bar{\mathbf{X}} = \bar{\mathbf{x}}_1, \dots, \bar{\mathbf{x}}_b$ разделимы ориентированной гиперплоскостью, если для некоторого $\mathbf{k} < 1$ существует такой вектор $\boldsymbol{\phi}$, что выполняются неравенства $\mathbf{x}_i^T \boldsymbol{\phi} \geq 1, \quad i = 1, \dots, a; \quad \bar{\mathbf{x}}_j^T \boldsymbol{\phi} \leq \mathbf{k}, \quad j = 1, \dots, b$.

Среди однопараметрического (по параметру $\mathbf{k} < 1$) множества векторов $\boldsymbol{\phi}$ существует вектор $\boldsymbol{\phi}_0$, определяющий такое направление, на котором проекции множеств \mathbf{X} и $\bar{\mathbf{X}}$ наи-

более отстоят друг от друга: $\boldsymbol{\phi}_0 = \arg \max_{\boldsymbol{\phi}} \left[\min_{\mathbf{x}_i \in \mathbf{X}} \mathbf{x}_i^T \boldsymbol{\phi} - \max_{\bar{\mathbf{x}}_j \in \bar{\mathbf{X}}} \bar{\mathbf{x}}_j^T \boldsymbol{\phi} \right]$.

При этом вектор $\boldsymbol{\phi}_0$ и определяемая им разделяющая гиперплоскость $\mathbf{x}\boldsymbol{\phi}_0 = \mathbf{C}_0$, где $\mathbf{C}_0 = \left(\min_{\mathbf{x}_i \in \mathbf{X}} \mathbf{x}_i^T \boldsymbol{\phi}_0 + \max_{\bar{\mathbf{x}}_j \in \bar{\mathbf{X}}} \bar{\mathbf{x}}_j^T \boldsymbol{\phi}_0 \right) / 2$ являются оптимальными. Указанная гиперплоскость отделяет точки множества \mathbf{X} (для этих точек $\mathbf{x}\boldsymbol{\phi}_0 > \mathbf{C}_0$) от точек множества $\bar{\mathbf{X}}$ (для этих точек $\bar{\mathbf{x}}\boldsymbol{\phi}_0 < \mathbf{C}_0$) и наиболее удалена от элементов объединенного множества $\mathbf{X} \cup \bar{\mathbf{X}}$ (см. рис. 6).

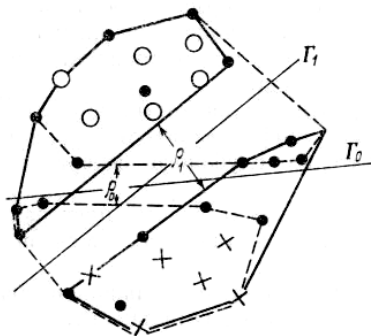


Рис. 6. Геометрическая интерпретация алгоритма упорядоченной минимизации риска на основе оптимальной разделяющей гиперплоскости.

Для поиска направляющего вектора Φ_0 оптимальной разделяющей гиперплоскости рассматривается конечное множество векторов Z , сформированное из векторов множеств X и \bar{X} : $Z = \{z_{ij} = x_i - \bar{x}_j\}$, $i = 1, \dots, a$; $j = 1, \dots, b$; (всего $a \times b$ элементов). При этом минимальный по модулю вектор Ψ_0 удовлетворяет неравенству

$$z_{ij}\Psi \geq 1, z_{ij} \in Z \quad (6)$$

Принципиально, что вектор Ψ_0 совпадает по направлению с оптимальным вектором Φ_0 , а величина $1/\|\Psi_0\|$ есть расстояние между проекциями множеств X и \bar{X} на направление вектора Ψ_0 . В результате поиск вектора Ψ_0 и определяемой им разделяющей гиперплоскости сводится к минимизации функционала $I = \Psi^T \Psi$ при выполнении ограничений (6), т.е. является известной [16] задачей нелинейного программирования.

Известные в настоящее время подходы к анализу акустических и нейтронных шумов энергетических ядерных реакторов обычно ограничиваются только измерением корреляционных функций и спектральных плотностей флуктуационных составляющих сигналов датчиков динамического давления в теплоносителе или внутризонных детекторов нейтронов, как это выполнено, например, в [17, 19]. В контексте общей оценки разработок в области диагностического обеспечения реакторных установок (включая автоматическую классификацию теплогидравлических режимов), необходимо подчеркнуть, что, несмотря на актуальность этой проблемы, математические модели распознавания теплогидравлических режимов в ТВС по параметрам акустического и нейтронного шума в АкЗ реакторов ВВЭР до настоящего времени не созданы. Вместе с тем подходы [7 - 12] к анализу диагностических сигналов целесообразно реализовать на основе двух рассмотренных моделей распознавания: статистической (на основе байесовского классификатора АСП диагностических сигналов) и геометрической (на основе формирования в многомерном признаковом пространстве разделяющей гиперплоскости). Разработанные математические модели автоматической диагностики режима начала кипения были проверены нами экспериментально.

С этой точки зрения представляют интерес представленные на рис. 7 результаты измерений АСП и когерентной спектральной плотности (КСП) нейтронного шума на выходах штатных родиевых детекторов прямого заряда (ДПЗ) в режимах с кипением и без кипения, выполненных на основе спектрального анализа магнитных записей этих диагностических сигналов, зарегистрированных во время международного эксперимента стран-участниц СЭВ с экспериментальной термометрической ТВС реактора ВВЭР-440 на АЭС «Райнсберг» [17] (в этих экспериментах в условиях АкЗ реактора ВВЭР-70 был обеспечен температурный контроль теплоотдающей поверхности ТВЭЛ). Записанные во время эксперимента с термометрической ТВС диагностические сигналы нейтронных детекторов E24 (высота установки 2160 мм от нижнего торца АкЗ) и E25 (высота установки 2400 мм) с выходов измерительного магнитографа SE-7000 подавались на входы цифрового спектроанализатора «Bruel&Kjaer»-2133, вычислявшего оценки КСП нейтронного шума в 1/3 октавных полосах в диапазоне частот $\Delta f = 0,1 - 50$ Гц.

При анализе спектральной структуры КСП нейтронного шума, измеренного в конвективном режиме теплоотдачи на поверхности ТВЭЛ в реакторах ВВЭР-440 [20] и ВВЭР-70 (см. рис. 7), обращает на себя внимание качественное подобие спектрального состава и огибающей КСП с характерным «срывом» когерентности в диапазоне частот $\Delta f = 3,15 - 4,0$ Гц в этих диагностических реализациях. При этом характерным отличием КСП нейтронного шума в условиях развитого пузырькового кипения при устойчивой генерации паровой фазы на поверхности ТВЭЛ (см. рис. 7, в) от соответствующих КСП сигналов нейтронных детекторов в конвективном режиме теплоотдачи является «срыв» когерентности в более низкочастотном диапазоне, а именно на частоте $\Delta f = 1,6$ Гц. Применительно к АСП нейтронного шума в условиях генерации паровой фазы на поверхности ТВЭЛ обращают на себя внимание

их следующие структурные особенности. Характерным отличием АСП нейтронного шума в условиях развитого пузырькового кипения при устойчивой генерации паровой фазы на поверхности ТВЭЛ (см. рис. 7) от соответствующих АСП сигналов нейтронных детекторов в конвективном режиме теплоотдачи является увеличение спектральной интенсивности в спектрах нейтронного шума на величину $\approx 20\%$ в полосе частот $\Delta f = 1,6 - 40$ Гц. При этом, как и при регистрации акустических эффектов в кипящем канале [13 - 16], повышение спектральной интенсивности при переходе от конвекции к развитому кипению на поверхности ТВЭЛ происходит последовательно в различных спектральных диапазонах, создавая тем самым предпосылки для идентификации различных фаз кипения.

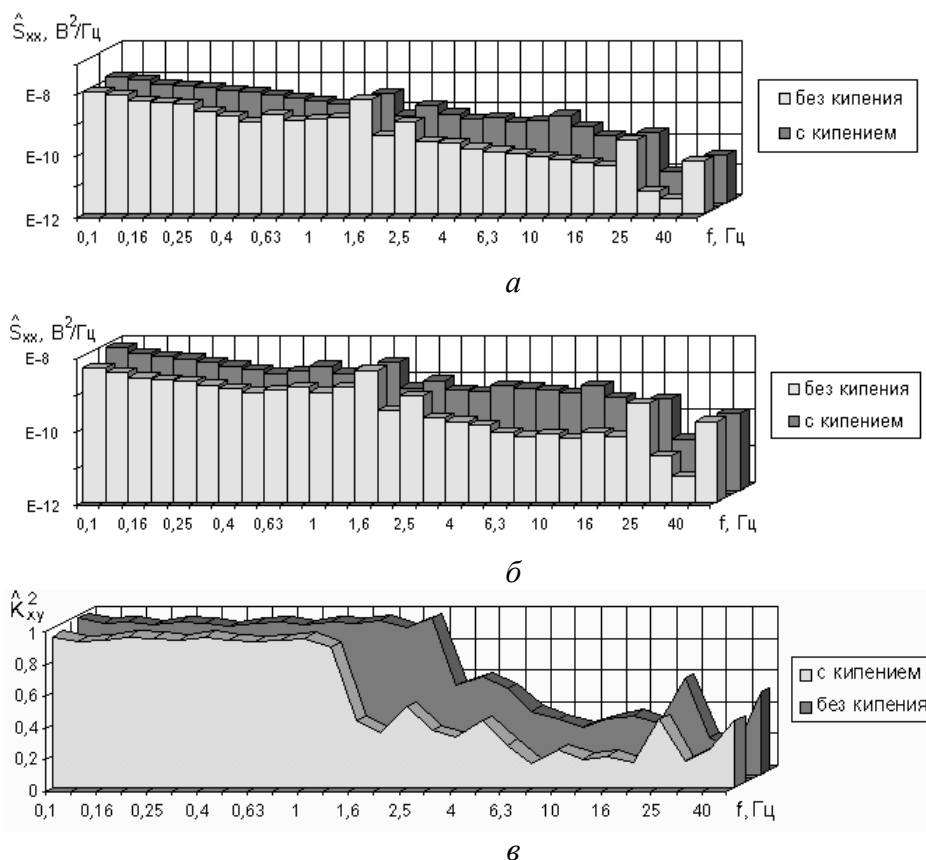


Рис. 7. Результаты измерений АСП одномерных (а, б) и КСП двумерных (в) сигналов нейтронного шума на выходах ДПЗ Е-24 (а) и ДПЗ Е-25 (б) экспериментальной ТВС реактора ВВЭР-70 в режимах конвективной теплоотдачи при параметрах теплоносителя: $P = 9,62$ МПа, $\rho_w = 2740$ кг/(м²·с), $T^{вх} = 246,2$ °С, $T^{вых} = 265,7$ °С, $\Delta T^{вых}_{нед} = 41,4$ °С, а также в режиме пузырькового кипения теплоносителя при $P = 9,62$ МПа, $\rho_w = 768$ кг/(м²·с), $T^{вх} = 247,3$ °С, $T^{вых} = 306,2$ °С, $\Delta T^{вых}_{нед} = 0,9$ °С.

На основе модели байесовского классификатора режимов структуры двухфазного потока в ТВС реактора ВВЭР-440, предусматривающей использование 28-мерных случайных реализаций АСП нейтронного шума (их отдельные реализации представлены на рис. 7) с 70 градациями спектральной интенсивности каждого спектрального признака, выполнено распознавание классов рассмотренного трехэлементного множества - класс A_1 (конвективный режим теплоотдачи на поверхности ТВЭЛ), класс A_2 (начало кипения теплоносителя на соответствующем участке ТВС), класс A_3 (развитое пузырьковое кипение) - по обучающей и контрольной выборкам. Получена надежность правильной идентификации каждого из теплогидравлических режимов ТВС (в условиях отсутствия ограничений на получение априорной статистической информации для обучения системы), достигающая 100 %.

На основе второй из рассмотренных математических моделей распознавания – геометрической – при существенно более ограниченном (более чем в три раза) объеме обучающей выборки выполнено распознавание АСП реализаций нейтронного шума той же мерности и с

таким же количеством градаций спектральной плотности для двух классов: конвективной теплоотдачи на поверхности ТВЭЛ (класс A_1) и начала пузырькового кипения в ТВС (класс A_2). Получена надежность правильной идентификации каждого из указанных теплогидравлических режимов, достигающая 92 %.

Распознавание указанных теплогидравлических режимов по результатам экспериментального исследования параметров АСП акустического шума в вышерассмотренной ТВС с электрообогреваемыми имитаторами ТВЭЛ на основе двух описанных в настоящей статье моделей – статистической и геометрической – также подтвердило высокую эффективность разработанных алгоритмов: средняя надежность правильной идентификации режима активации первых паровых пузырей на теплоотдающей поверхности была не ниже 95 %.

Выводы

1. Разработаны и практически реализованы две математические модели (статистическая и многомерная геометрическая), предназначенные для автоматического распознавания начала кипения теплоносителя в реакторе ВВЭР на основе диагностической информации, содержащейся в информационно значимых реакторных шумах.

2. Статистическая модель распознавания теплогидравлических аномалий в каналах реактора некипящего типа адаптирована к условиям отсутствия ограничений на получение априорной статистической информации для обучения распознающей системы и обеспечивает надежность правильной идентификации начала генерации паровой фазы на уровне 100 % по контрольным статистическим выборкам.

3. Многомерная геометрическая модель распознавания начала кипения адаптирована к условиям существенных ограничений на получение априорной обучающей информации и обеспечивает надежность правильной идентификации этого аномального теплогидравлического режима на уровне 95 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Безопасность ядерных энергетических установок* / О. Б. Самойлов, Г. Б. Усынин, А. М. Бахметьев. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 280 с.
2. *Шараевский И.Г., Письменный Е.Н., Домашев Е.Д.* Возможности совершенствования компьютерных систем контроля АЭС на основе методов искусственного интеллекта. // Пром. теплотехника. – 2000. – Т. 22. – № 1. – С. 70 - 77.
3. *Шараевский И.Г., Домашев Е.Д., Шараевская Е.И.* Проблемы создания компьютерных систем поддержки операторов АЭС на основе искусственного интеллекта // Энергетика: экономика, технология, экология. – 2000. – № 1. – С. 36 - 42.
4. *Левитан Л.Л., Боровский Л.Я.* Голография пароводяных потоков. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 152 с.
5. *Фиалко Н.М., Шараевский И.Г., Зимин Л.Б., Меранова Н.О.* Эволюция подходов к определению начала кипения теплоносителя на теплоотдающей поверхности ТВЭЛ // Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобиля. – 2007. - Вып. 8. – С. 44 - 50.
6. *Теплообмен и гидродинамика двухфазных потоков в атомной и тепловой энергетике* / Дж. Делайе, М. Гио, М. Ритмюллер: Пер. с англ. - М.: Энергоатомиздат, 1984. - 424 с.
7. *Орнатский А.П., Шараевский И.Г.* Термоакустические процессы при кипении воды в кольцевом канале в условиях вынужденного движения // Теплофизика и теплотехника. - 1976. - вып. 31. - С. 36 - 41.
8. *Орнатский А.П., Шараевский И.Г.* Особенности возникновения и развития термоакустических колебаний при кипении воды в условиях вынужденного движения // Теплообмен и гидродинамика. - К.: Наук. думка, 1977. - С. 26 - 33.
9. *Ornatskiy A.P., Sharayevskiy I.G.* Acoustic Phenomena Accompanying Boiling of Water in Annuli under Forced Convection // Heat Transfer - Soviet Research. - 1977. - Vol. 9, No. 3. - P. 28 - 34.
10. *Ornatskiy A.P., Sharayevskiy I.G.* Onset and Development of Thermoacoustic Oscillations in Forced Convection Boiling of Water // Heat Transfer - Soviet Research. - 1980. - Vol. 12, No. 1. - P. 137 - 144.

11. *Шараевский И.Г.* Об акустических резонансных колебаниях парогенерирующего канала. // Пром. теплотехника. – 1980. – Т. 2. - № 5. – С. 24 - 29.
12. *Орнатский А.П., Шараевский И.Г.* Акустическая диагностика начала кипения воды в кольцевом канале // Там же. – 1983. – Т. 5. - № 6. – С. 21 - 26.
13. *Мионов Ю.В., Шпанский С.В.* Распределение параметров двухфазного потока по сечению канала с пучками ТВЭЛов // Атомная энергия. - 1975. - Вып. 6, т. 39. - С. 403 - 408.
14. *Архипов А.П., Орнатский А.П., Маевский Е.М.* Исследование распределения массовой скорости и энтальпии теплоносителя по сечению семистержневого пучка // Теплоэнергетика. - 1981. - № 10. - С. 64 - 66.
15. *Шараевский И.Г.* Метод распознавания начала вскипания теплоносителя в реакторе ВВЭР на основе байесовского классификатора нейтронных шумов // Пром. теплотехника. – 1999. – Т. 21. - № 6. – С. 69 - 75.
16. *Карманов В.Г.* Математическое программирование. – М.: Наука, 1986. – 288 с.
17. *Скартон Х.А., Макдональд Д.Ф., Кэри У.М.* Обзор акустических методов обнаружения кипения в ядерных реакторах // Аэрогидромеханический шум в технике / Пер. с англ. - М.: Мир, 1980.- С. 166 - 198.
18. *Kosaly G., Albrecht R.W., Crowe R.D. et al.* Neutronic response to two-phase flow in a nuclear reactor // Progress in Nuclear Energy. - 1982. - No. 9. - P. 23 - 36.
19. *Kozma R., VanDam H., Hoogenboom E.* Identification of flow patterns by neutron noise analysis during actual coolant boiling in thin reasangular channels // Nuclear Technology. - 1992. - Vol. 100, No. 10. - P. 97 - 109.
20. *Фиалко Н.М., Шараевский И.Г., Меранова Н.О.* Автоматическое обнаружение начала кипения теплоносителя в активной зоне реактора ВВЭР // Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. – 2006. – Вип. 6. – С. 68 - 76.

Поступила в редакцию 05.08.08