

АВТОМАТИЧЕСКОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ НАЧАЛА КИПЕНИЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В АКТИВНОЙ ЗОНЕ РЕАКТОРА ВВЭР

Н. М. Фиалко, И. Г. Шараевский, Н. О. Меранова

Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Киев

Основная идея работы состоит в том, что шумовые сигналы на выходе основных технологических параметров ядерной энергоустановки (нейтронного потока, динамического давления и др.) содержат важную информацию о техническом состоянии оборудования. Были разработаны эффективные алгоритмы распознавания случайных процессов, которые после соответствующего преобразования рассматриваются как многомерные случайные векторы. Автоматическая классификация этих векторов в разработанных алгоритмах реализуется на основе функции правдоподобия, в частности байесовского классификатора и решающих функций. Применение байесовского классификатора основано на построении многомерных распределений вероятностей в признаковом пространстве соответствующей мерности, с помощью которого описывается случайные вектор-реализации соответствующих образов, подлежащие автоматической классификации.

Условные обозначения:

<p>АкЗ – активная зона; АСП – автоспектральная плотность; АЭС – атомная электростанция; ВВЭР – водо-водяной энергетический реактор; ДПЗ – детектор прямого заряда; ИИ – искусственный интеллект; СВРК – система внутриреакторного контроля; СПО – средства поддержки оператора; ТВС – тепловыделяющая сборка; ТВЭЛ – тепловыделяющий элемент; ЯР – ядерный реактор; А - класс образов; В - распознаваемый объект; F - функция плотности вероятности; f - частота; G - функция потерь; g - элемент матрицы потерь; H - энтропия; I - информация;</p>	<p>K - эталон класса образов; L - среднее квадратическое расстояние; M - мощность множества классов; N - мощность множества признаков; N - мощность; P - вероятность; p - давление; R - мощность множества градаций; R - средний риск принятия решения; T - температура; w - скорость; X - вектор-реализация; γ - функционал принадлежности; ρ - плотность. Индексы: вх – вход; вых – выход; нед – недогрев; эл – электрический.</p>
---	--

Важным условием безопасной эксплуатации современных энергоблоков АЭС с ЯР большой мощности является теплогидравлическая надежность их АкЗ. Как известно [1], надежность и безопасность ЯР, охлаждаемых жидким теплоносителем, - кипящих и некипящих - в значительной мере определяются возможностями раннего обнаружения аварийных режимов теплоотдачи на поверхности ТВЭЛ. Главную опасность для некипящих ЯР типа ВВЭР, АкЗ которых охлаждается водой под давлением в режиме конвективной теплоотдачи, представляет кризис теплоотдачи первого рода, т.е. режим пленочного кипения, возникновение которого приводит к разрушению поверхности ТВЭЛ. Потенциальная опасность неконтролируемого перехода режима теплоотдачи в АкЗ ВВЭР от конвекции сначала к пузырьковому кипению на поверхности ТВЭЛ, а затем и к кризису первого рода диктует необходимость обнаружения начала кипения в любой точке АкЗ и вынуждает принимать меры к его подавлению, несмотря на высокие значения коэффициента теплоотдачи, которыми характеризуется пузырьковое кипение теплоносителя в ТВС.

Согласно оценкам, выполненным в [2], существуют реальные резервы повышения мощности ЯР типа ВВЭР путем форсирования теплоотдачи с поверхности ТВЭЛ на основе перехода к режиму пузырькового кипения, в первую очередь центральных ТВС АкЗ.

Как отмечено в [3], определяющим условием безопасного форсирования тепловой мощности реакторов водо-водяного типа является придание штатным измерительным комплексам СВРК таких интеллектуальных функций [4], как распознавание основных структурных форм двухфазного потока в ТВС. Следует отметить, что в контексте проблемы идентификации теплогидравлических режимов теплоносителя в АкЗ реакторов ВВЭР указанная задача формулируется как распознавание нижней границы пузырькового режима течения двухфазного потока - начала кипения - по шумам технологических параметров: давления, температуры, расхода теплоносителя, а также нейтронного потока. Необходимо подчеркнуть, что с точки зрения возможности получения диагностической информации о структуре парожидкостного потока теплоносителя в любой части объема АкЗ реакторов ВВЭР путем распознавания стохастических сигналов штатных внутризонных измерительных средств, таких как электронно-эмиссионные детекторы нейтронов [5], диагностика теплогидравлических режимов ТВС по параметрам нейтронного шума альтернативы не имеет.

С этой точки зрения необходимость разработки для существующих типов СВРК математического обеспечения на основе концепции ИИ [4, 6] обусловлена важностью придания компьютерным комплексам СВРК функции распознавания начала вскипания теплоносителя на поверхности ТВЭЛ, а также других теплогидравлических режимов ТВС в условиях их физической неопределенности как вероятностных объектов. Согласно [7, 8], основное содержание диагностических процедур принципиально должны составлять именно алгоритмы автоматического распознавания стохастических диагностических сигналов. Эти функции, однако, современными системами мониторинга основного оборудования ядерных энергетических установок как средствами информационной поддержки операторов, т.е. СПО АЭС [9], в настоящее время не обеспечиваются. Изложенное следует отнести не только к системам мониторинга вибрации оборудования АЭС - ALLY (Westinghouse El. Corp.), pwVDN (ABB), PC-SUS (Siemens), COMPASS (Brueel & Kjaer), но и к наиболее современным типам СВРК, таким, например, как система СКУД (РНЦ «Курчатовский институт»). Приведенный перечень систем мониторинга, математическое обеспечение которых основано на логике бинарного типа и, в частности, на операции сравнения интегрального уровня диагностируемого сигнала (или совокупности отдельных его спектральных компонент) с предельно допустимыми для данного параметра его значениями, может быть существенно расширен за счет компьютерных комплексов СПО - SPDS, DASS, HDSR (США), DMS, PODIA, COSS (Япония), STAR (ФРГ) [7 - 9], созданных в предыдущие годы и аналогичных по реализованному в них детерминированному принципу обработки диагностических сигналов.

Отсутствие в настоящее время образцов нового поколения СВРК, математическое обеспечение которых, основанное на концепциях ИИ, позволило бы обеспечить надежное обнаружение теплогидравлических режимов ТВС по параметрам нейтронного шума в АкЗ реакторов ВВЭР, обусловлено сложными условиями распознавания данных вероятностных объектов. Среди этих условий, в первую очередь, необходимо отметить следующие:

1. Вероятностный характер взаимосвязи, существующий между основными типами структурных форм двухфазного потока в ТВС и локальными флуктуациями нейтронного потока в АкЗ водо-водяного ЯР, в основе которых лежат обусловленные фазовым переходом на поверхности ТВЭЛ локальные изменения термализационных свойств замедлителя.

2. Нечеткость границ между режимом конвективной теплоотдачи на поверхности ТВЭЛ и переходом к устойчивой генерации паровой фазы дискретными центрами парообразования в режиме развитого пузырькового кипения.

3. Трудности получения в условиях АкЗ ЯР априорной статистической информации о распознаваемом множестве классов теплогидравлических режимов и, в особенности, о пре-

даварийных структурных формах двухфазного потока для реализации процедуры обучения распознающей системы в соответствии с концепциями статистической теории распознавания образов [6].

Как известно [1], флуктуационная составляющая сигнала внутризонного нейтронного детектора, обусловленная временными и пространственными флуктуациями плотности потока нейтронов, определяется как нейтронный шум. Общая теория реакторных шумов, дающая представление о физических процессах, лежащих в основе указанных временных и пространственных флуктуаций плотности нейтронного потока, хотя и в существенно упрощенном виде, а именно на основе точечной модели кинетики ЯР, разработана в настоящее время только для реакторов «нулевой» (порядка долей ватта) мощности [10]. Следует подчеркнуть, что такая точечная линейная модель кинетики не может адекватно описать нейтронные шумы энергетического ЯР, специфика которого требует применения многоточечных (многозонных) моделей с обратными связями. Последние включают в рассмотрение не только сам реактор, но и насосы, парогенераторы, паровой турбоагрегат. Данную многозонную модель отличает высокая сложность. Указанное обстоятельство, а также то, что в такой модели существенную роль играют специфические особенности конкретного типа энергетического ЯР, обусловили тот факт, что общая теория нейтронных шумов в энергетическом ЯР до настоящего времени не создана. Известные в настоящее время подходы к анализу нейтронных шумов энергетических ЯР ограничиваются только измерением корреляционных функций и спектральных плотностей флуктуационных составляющих внутризонных детекторов нейтронов, как это выполнено, например, в [11, 12]. Изложенное позволяет, таким образом, заключить, что математические модели распознавания теплогидравлических режимов в ТВС по параметрам нейтронного шума в АкЗ реакторов ВВЭР до настоящего времени, несмотря на актуальность этой проблемы, фактически не разработаны. Вместе с тем подходы, развитые Шараевским И. Г. при разработке систем распознавания термогидроакустических сигналов [13 - 16], близких по своим статистическим свойствам к нейтронным шумам в реакторах водо-водяного типа, в задаче распознавания начала вскипания теплоносителя в ТВС ВВЭР были реализованы на основе результатов рассмотренных ниже экспериментов, а также излагаемой далее математической модели.

На рис. 1 представлены результаты измерений АСП нейтронного шума на выходах штатных электронно-эмиссионных нейтронных детекторов ДПЗ-1М с родиевым эмиттером в различных точках по высоте ТВС № 08-53 (ДПЗ № 1, 2, 4, 6, 7) реактора ВВЭР-440 энергоблока № 2 Ровенской АЭС в номинальном режиме его эксплуатации, т.е. на электрической мощности $N_{эл} = 426$ МВт (эксперимент проведен 14 марта 1984 г., время измерений - 19 ч 26 мин). Сигналы нейтронных детекторов после предварительного усиления и фильтрации, выполненных посредством измерительного комплекса для изучения шумовых составляющих ДПЗ (разработка РНЦ «Курчатовский институт»), записывались на магнитную ленту многоканальным измерительным магнитографом Н-046. Записанные сигналы в режиме воспроизведения подавались на входы цифрового спектроанализатора «Briel & Kjaer»-2133, вычислявшего оценки АСП нейтронного шума в 1/3 октавных полосах в диапазоне частот $\Delta f = 0,1 - 50$ Гц. В указанном теплогидравлическом режиме в ТВС № 08-53 кипение на поверхности ТВЭЛ отсутствовало. На рис. 2 представлены результаты аналогичных измерений АСП нейтронного шума на выходах аналогичной внутрореакторной сборки ДПЗ-1М в различных точках по высоте ТВС № 11-54 реактора ВВЭР-440 энергоблока № 2 Ровенской АЭС в номинальном режиме его эксплуатации, т.е. на мощности $N_{эл} = 426$ МВт (эксперимент проведен 14 марта 1984 г., время измерений - 19 ч 35 мин). В указанном теплогидравлическом режиме ТВС № 11-54 кипение на поверхности ТВЭЛ, как и в предыдущем эксперименте, отсутствовало. Как следует из результатов сравнения спектрального состава и огибающих представленных на рис. 1 и 2 спектров нейтронного шума в режиме конвектив-

ной теплоотдачи, которые были измерены в различных точках АкЗ реактора, частотная структура этих спектров при отсутствии генерации паровой фазы на поверхности ТВЭЛ качественно подобна. Вместе с тем отсутствие штатных средств температурного контроля теплоотдающих поверхностей ТВЭЛ в АкЗ реакторов ВВЭР существенно затрудняет получение априорных статистических данных, необходимых для обучения распознающей системы в соответствии с подходами статистической теории распознавания образов в условиях, когда границы распознаваемых классов уже установлены.

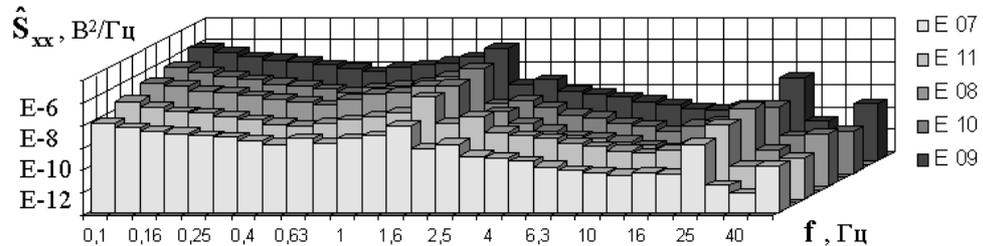


Рис. 1. Результаты измерений АСП одномерных сигналов нейтронного шума на выходе ДПЗ № 1, 2, 4, 6, 7 в ТВС № 08-53 реактора ВВЭР-440 в режиме конвективной теплоотдачи на поверхности ТВЭЛ. Теплогидравлические параметры теплоносителя: $p = 12,35$ МПа, $\rho W = 4200$ кг/м²с, $T_{ex} = 263,6$ °С, $T_{вых} = 294,6$ °С, $\Delta T_{нед}^{вых} = 32,3$ °С.

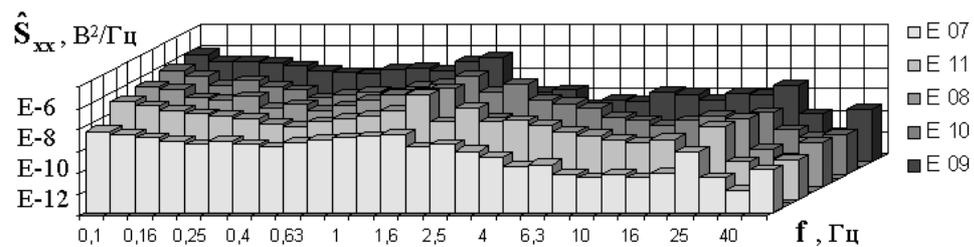


Рис. 2. Результаты измерений АСП одномерных сигналов нейтронного шума на выходе ДПЗ № 1, 2, 4, 6, 7 в ТВС № 11-54 реактора ВВЭР-440 в режиме конвективной теплоотдачи на поверхности ТВЭЛ. Теплогидравлические параметры теплоносителя: $p = 12,35$ МПа, $\rho W = 4200$ кг/м²с, $T_{ex} = 263,7$ °С, $T_{вых} = 294,0$ °С, $\Delta T_{нед}^{вых} = 32,9$ °С.

С этой точки зрения представляют интерес представленные на рис. 3 (а, б) результаты измерений АСП нейтронного шума на выходах аналогичных штатных родиевых ДПЗ в режимах с кипением и без кипения, выполненные 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 был обеспечен температурный контроль теплоотдающей поверхности ТВЭЛ в условиях АкЗ реактора ВВЭР-70). 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 «Brüel&Kjaer»-2133, вычислявшего оценки АСП нейтронного шума в 1/3 октавных полосах в диапазоне частот $\Delta f = 0,1 - 50$ Гц. При анализе спектральной структуры АСП нейтронного шума, измеренного в конвективном режиме теплоотдачи на поверхности ТВЭЛ в реакторах ВВЭР-440 (см. рис. 1 и 2) и ВВЭР-70 (см. рис. 3), обращает на себя внимание качественное подобие спектрального состава и огибающей АСП этих диагностических сигналов. Характерным отличием АСП нейтронного шума в условиях развитого пузырьково-

го кипения при устойчивой генерации паровой фазы на поверхности ТВЭЛ (см. рис. 3) 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

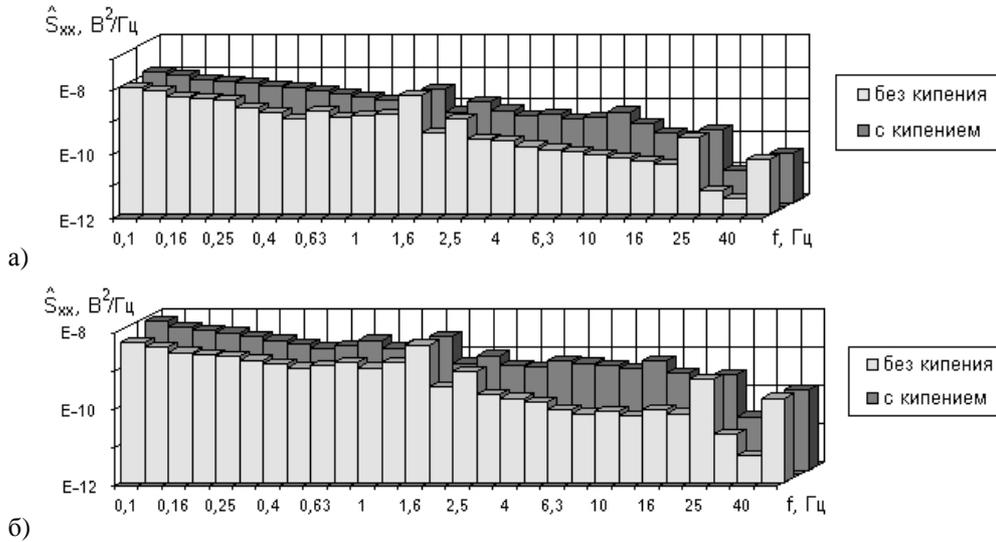


Рис. 3. Результаты измерений АСП одномерных сигналов нейтронного шума на выходе ДПЗ Е-24 (а) и ДПЗ Е-25 (б) в экспериментальной ТВС реактора ВВЭР-70 в режимах конвективной теплоотдачи при параметрах теплоносителя: $p = 9,62$ МПа, $\rho W = 2740$ кг/м²с, $T_{\text{ex}} = 246,2$ °С, $T_{\text{вых}} = 265,7$ °С,

$\Delta T_{\text{нед}}^{\text{вых}} = 41,4$ °С, а также в режиме пузырькового кипения теплоносителя при $p = 9,62$ МПа,

$\rho W = 768$ кг/м²с, $T_{\text{ex}} = 247,3$ °С, $T_{\text{вых}} = 306,2$ °С, $\Delta T_{\text{нед}}^{\text{вых}} = 0,9$ °С.

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. С учетом вышерассмотренных особенностей динамики изменения структуры АСП нейтронного шума в реакторах водо-водяного типа в условиях отсутствия ограничений на получение априорной обучающей статистики (например, при реализации процедуры обучения диагностической распознающей системы на основе предварительных температурных измерений поверхности ТВЭЛ с целью определения границ основных теплогидравлических режимов и, в частности, начала кипения теплоносителя) как в режиме конвективной теплоотдачи в АкЗ ВВЭР, так и в других, существенно более форсированных тепловых режимах ТВС, в настоящей работе предложена следующая модель распознавания динамики вскипания теплоносителя в ТВС этих ЯР.

Задача идентификации основных типов структурных форм двухфазного потока в ТВС ВВЭР формулируется как распознавание теплогидравлических режимов кипящего канала на основе случайных параметров АСП нейтронного шума, который, как следует из вышеизложенного, содержит диагностическую информацию об этих режимах. Тогда 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 соотносится с определенным типом структурной формы двухфазного потока в ТВС. В рассматриваемой модели распознавания используется трехэлементное множество классов теплогидравлических режимов: A_1 - конвекция, A_2 - начало кипения, A_3 - развитое пузырьковое кипение, т.е. мощность множества распознаваемых классов в рассматриваемой задаче составляет $M = 3$.

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

Таким образом, каждый из трех A_i , $i = 1, 2, \dots, M$ теплогидравлических режимов, представленный множеством X_N диагностических признаков, занимает в N -мерном пространстве признаков некоторую область. Описание этой области, отображающей класс (один из трех диагностируемых теплогидравлических режимов) в пространство признаков, является эталоном K_i класса A_i . Вследствие случайного характера вскипания теплоносителя и формирования определенного типа теплогидравлического режима A_i , а также вероятностной природы диагностических признаков как спектральных компонент АСП нейтронного шума классов A_i , образующих в N -мерном пространстве множества, которые пересекаются в нем, задача распознавания сводится к формированию по данным обучающей статистической выборки эталонов K_i всех M -классов, на основе которых распознавание неизвестного объекта осуществляется по правилу

$$\bar{x}_j \in \bar{K}_i \Rightarrow \bar{x}_j \in \bar{x}_i \Rightarrow B(\bar{x}_j) \in A(\bar{x}_i). \quad (1)$$

Проверка статистической модели распознавания, реализующей правило (1) в настоящей работе, реализована по данным измерения множества диагностических признаков X_N в вышерассмотренных экспериментах по исследованию параметров АСП нейтронного шума. При этом обучающая выборка представлена реализациями случайных объектов, принадлежность которых к M -классам можно считать установленной. Таким образом, вероятностная модель распознавания предполагает наличие исходной априорной информации, например о конвективном режиме теплоотдачи, которая получена на этапе обучения распознающей системы из массивов статистических данных по распознаваемым классам множества A . На основе этой информации формируются соответствующие этому множеству эталоны K . Таким образом, 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 $P(\bigcup_{k=1}^N x_k | A_i)$, $i = 1, 2, \dots, M$. По результатам процедуры обучения формируется множество эталонов распознаваемых классов $K_i \{P(A_i); P(\bigcup_{k=1}^N x_k | A_i)\}$, которые размещаются в памяти вычислительной системы.

Наряду с формированием эталонов K_i принципиальной задачей при построении систем распознавания является разработка алгоритма распознавания, т.е. такой формализованной

процедуры, посредством которой устанавливается принадлежность распознаваемого объекта к конкретному классу множества A . При этом сущность критерия распознавания состоит в формировании правила, согласно которому осуществляется построение гиперповерхности в признаковом пространстве, разделяющем в нем области различных классов. Критериями распознавания могут быть:

- 1) среднеквадратическое расстояние L между данным объектом и всеми элементами B_j образа, образующего описание каждого из классов;
- 2) функционал $\gamma_i(\vec{X})$, число которого равно M , такой, что

$$\forall j \in \bar{M} : [\vec{x} \in \bar{K}_j \Leftrightarrow \forall i \in \bar{M} / \{j\} : \gamma_j(\vec{X}) > \gamma_i(\vec{X})], \quad (2)$$

т.е. каждый из этих функционалов принимает на всех элементах образа, к которому принадлежит, большее значение, чем функционалы всех других образов. Необходимо подчеркнуть, что оптимальное решение $\gamma_i(\vec{X})$ в случае известных априорных вероятностей классов $P(A_i)$ должно обеспечить минимизацию среднего риска, который представляется как

$$R_\gamma = \int \int_M G[\gamma(X), A] \cdot F\left(\bigcup_{k=1}^N x_k | A_i\right) P(A) dx dA, \quad (3)$$

где $G[\gamma(X), A]$ - функция потерь как следствие принятия решения.

Минимальное значение среднего риска R_γ , как известно [6], обеспечивает байесовский классификатор, использование которого целесообразно в случае многократного принятия решений в одинаковых условиях, отсутствии ограничений на получение априорных статистических данных для обучения, а также известных априорных вероятностях классов, которые могут считаться равновероятными $P(A_1) = P(A_2) = \dots = P(A_M) = 1/M$, что соответствует условиям решаемой задачи распознавания. Байесовское решающее правило заключается в принятии для неизвестной реализации решения о принадлежности ее к классу A_i , если выполняется условие

$$\sum_{i=1}^M g_{i,j} P(A_i) F\left(\bigcup_{k=1}^N x_k | A_i\right) \leq \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^M g_{i,j} P(A_i) F\left(\bigcup_{k=1}^N x_k | A_i\right), \quad (4)$$

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

В случае одинаковых стоимостей ошибочных решений, т.е. при $g_{i,j} = 1$, а также при отсутствии потерь в случае правильной идентификации объекта, т.е. при $g_{i,i} = 0$, байесовский классификатор реализуется на основе вычисления апостериорных вероятностей принадлежности неизвестной реализации B_i для каждого из M -классов распознаваемого множества:

$$P(A_i | \bigcup_{k=1}^N x_k) = \frac{P(A_i) F\left(\bigcup_{k=1}^N x_k | A_i\right)}{\sum_{i=1}^M P(A_i) F\left(\bigcup_{k=1}^N x_k | A_i\right)}. \quad (5)$$

При этом решение о принадлежности распознаваемого объекта, т.е. АСП неизвестной принадлежности, к конкретному классу множества M принимается по максимальной из вычисленных, согласно (5), для этих классов апостериорных вероятностей.

Как известно [4, 6], надежность правильной идентификации вероятностных объектов растет при увеличении мерности признакового пространства, используемого при их распознавании, в частности, на основе рассмотренного байесовского классификатора. Вместе с тем некоторые из признаков нецелесообразно включать в эталоны K_i , $i = 1, 2, \dots, M$ распозна-

ваемых классов A_i ввиду низкой информативности этих признаков. В связи с изложенным возникает задача минимизации числа признаков, используемых при распознавании. В оценке качества признаков, усредненного по множеству распознаваемых классов, эффективно может быть использован информационный подход, основанный на определении количества информации по каждому признаку I_{x_k} , $k=1, 2, \dots, N$, получаемому системой распознавания при идентификации данного объекта. Количество информации I_{x_k} , получаемое системой распознавания при идентификации объекта с k дискретными значениями признака x_k , который принимает значения $x_1^k, x_2^k, \dots, x_R^k$ с вероятностями $P(x_i^k)$, усредненное по множеству классов и множеству R дискретных значений признаков, определяется как разность априорной энтропии классов (исходная априорная неопределенность системы) и неопределенность решения (усредненная энтропия системы)

$$I_{x_k} = H(A) - \bar{H}(A_i | x_k) = - \sum_{i=1}^M P(A_i) \cdot \log P(A_i) + \sum_{i=1}^M \sum_{l=1}^R P(x_l^k | A_i) \cdot P(A_i | x_l^k) \cdot \log P(A_i | x_l^k). \quad (6)$$

При этом информационное качество признака x_k выше качества признака x_s , если $I_{x_k} > I_{x_s}$.

На основе рассмотренной модели байесовского классификатора режимов пузырьковой структуры двухфазного потока в ТВС реактора ВВЭР-440, которая предусматривает использование 28-мерных случайных реализаций АСП нейтронного шума (их отдельные реализации представлены на рис. 1 - 3), причем каждый спектральный признак имел 70 градаций спектральной интенсивности, 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), A_3 (развитое пузырьковое кипение) - по обучающей и контрольной выборкам. Достигнута надежность правильной идентификации каждого из указанных теплогидравлических режимов ТВС в реакторе водо-водяного типа (в условиях отсутствия ограничений на получение априорной статистической информации для обучения системы), достигающая 98 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ломакин С.С. Ядерно-физические методы диагностики и контроля активных зон реакторов АЭС. - М.: Энергоатомиздат, 1986. - 120 с.
2. Зверков В.В., Игнатенко Е.И., Волков А.П. Резервы повышения мощности действующих АЭС с ВВЭР-440. - М.: Энергоатомиздат, 1987. - 80 с.
3. 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.
4. Хант Э. Искусственный интеллект: Пер. с англ. / Под ред. В. Л. Стефанюка. - М.: Мир, 1978. - 558 с.
5. Детекторы для внутриреакторных измерений энерговыделения / М. Г. Мительман, Б. Г. Дубовский, В. Ф. Любченко, Н. Д. Розенблюм. - М.: Атомиздат, 1977. - 152 с.
6. Фомин Я.А., Тарловский Г.Р. Статистическая теория распознавания образов. - М.: Радио и связь, 1986. - 264 с.
7. Комаревский И.В. Экспертные системы для поддержки оператора в управлении ЯЭУ // Атомная техника за рубежом. - 1988. - № 7. - С. 3 - 9.
8. Калинушкин А.Е., Митин В.И., Семченков Ю.М. Создание экспертных систем для ядерной энергетики // Атомная техника за рубежом. - 1990. - № 7. - С. 3 - 12.
9. Анохин А.Н., Острейковский В.А., Сальников Н.Л. Системы поддержки оператора АЭС.- Обнинск: Б.И., 1988. - 92 с.
10. Казанский Ю.А., Матусевич Е.С. Экспериментальные методы физики реакторов. - М.: Энергоатомиздат, 1984. - 272 с.

11. *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.
12. *Kozma R., VanDam H., Hoogenboom E.* Identification of flow patterns by neutron noise analysis during actual coolant boiling in thin rectangular channels // *Nuclear Technology*. - 1992. - Vol. 100, No. 10. - P. 97 - 109.
13. *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.
14. *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.
15. *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.
16. *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.
17. *Baumberger P., Jeremias E., Krause F. u.a.* Die Experimentale kassette EK-1 im Druckwasser-Reaktor des KKW Rheinsberg // *Kernenergie*. – 1982. - № 6.- S. 240 - 248.

Поступила в редакцию 26.09.06

**30 АВТОМАТИЧНЕ ВИЯВЛЕННЯ ПОЧАТКУ КИПІННЯ ТЕПЛОНОСІЯ
В АКТИВНІЙ ЗОНІ РЕАКТОРА ВВЕР****Н. М. Фіалко, И. Г. Шараєвський, Н. О. Меранова**

Головна ідея роботи полягає в тому, що шумові сигнали на виході вимірювачів головних технологічних параметрів ядерної енергетичної установки (нейтронного потоку, динамічного тиску тощо) несуть важливу інформацію про технічний стан устаткування. Було розроблено ефективні алгоритми розпізнавання випадкових процесів, які після відповідного спектрального перетворення розглядаються як багатомірні випадкові вектори. Автоматична класифікація цих векторів у розроблених алгоритмах реалізується на основі функції вірогідності, зокрема байєсівського класифікатора та вирішуючих функцій. Застосування байєсівського класифікатора засновано на побудові багатомірних розподілів імовірностей в ознаковому просторі відповідної мірності, за допомогою якого описуються випадкові вектори реалізації відповідних образів, що підлягають автоматичній класифікації.

30 AUTOMATIC DISCLOSURE OF BOILING BEGINNING IN ACTIVE ZONE OF WWER REACTOR**N. M. Fialko, I. G. Sharaevsky, N. O. Meranova**

The principal idea of the work consists in that noise signals at the outlet of main nuclear power plant technological parameter gauges (neutron flux, dynamic pressure etc.) contain important information on technical state of the equipment. Efficient algorithms of random process identification that after respective spectral transformation are considered as multidimensional random vectors were developed. Automated classification of these vector in the developed algorithms in realized on the base of probability function, especially of Bayes classifier. Application of classifier is based on construction of multidimensional distribution of probabilities in feature space of corresponding dimension, with the help of which random vectors-realizations of corresponding images that are subjected to automated classification are described.