

ПРИОРИТЕТНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ БЕЗОПАСНОСТИ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

© 2011 г. А. А. Ключников, И. Г. Шараевский, Н. М. Фиалко, Л. Б. Зимин

Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Киев

Рассмотрены приоритетные направления исследований и разработок, которые выполняются в отделе надежности теплотехнического оборудования ядерных реакторов. Критически проанализированы известные методы диагностики и контроля процессов генерации паровой фазы в водоохлаждаемых ядерных ректорах. Проанализированы задачи разработки диагностической системы нового поколения на основе интеллектуального программного обеспечения.

Ключевые слова: теплогидравлические процессы, интеллектуальная диагностика.

Одной из важнейших проблем современной атомной энергетики является обеспечение эксплуатационной безопасности действующих и проектируемых АЭС. В этой комплексной и многоплановой проблеме теплофизические аспекты обеспечения теплогидравлической надежности активных зон (АкЗ) водоохлаждаемых энергетических ядерных реакторов некипящего (ВВЭР, PWR), а также кипящего (РБМК, BWR) типов занимают особое место. Вся история атомной энергетики неопровержимо свидетельствует о том, что именно недостаток знаний в области теплообмена на поверхности ТВЭЛ и гидродинамики реакторных каналов в большинстве случаев является наиболее частой причиной возникновения и развития тяжелых аварий на АЭС.

Не является исключением и Чернобыльская катастрофа. В настоящее время можно считать окончательно установленным, что исходным событием, которое инициировало последовавший за ним аварийный переходный процесс, стало именно неконтролируемое штатными техническими средствами системы внутриреакторного контроля (СВРК), не предусмотренное на этапе проектирования исполнительных органов системы управления и защиты (СУЗ) и (в силу этих объективных причин) неизвестное оперативному персоналу энергоблока начало генерации паровой фазы в нижней части АкЗ реактора РБМК-1000. Это событие произошло в течение первых пяти секунд с момента начала движения поглощающих стержней при срабатывании аварийной защиты АЗ-5, задействованной с целью останова реактора. Результатом последовавшего за вскипанием теплоносителя переходного процесса, как известно, явился разгон реактора на мгновенных нейтронах, кризис теплоотдачи 2-го рода на поверхности ТВЭЛ, парациркониевая реакция, разрушение всего реакторного отделения и значительное радиационное загрязнение больших территорий.

С целью повышения эффективности решения широкого круга теплофизических задач, непосредственно связанных с обеспечением теплогидравлической надежности АкЗ, в 2006 г. В Институте проблем безопасности АЭС НАН Украины в составе отделения безопасной эксплуатации АЭС был создан отдел надежности теплотехнического оборудования ядерных энергоблоков. Основные усилия нового научного коллектива направлены на решение нижеследующего комплекса научных проблем.

В последние годы при обеспечении фундаментальных функций безопасности операторы блочных щитов управления (БЩУ) сталкиваются с существенным усложнением эксплуатационных задач, а также острым дефицитом времени для выработки диагностических и управляющих решений. В этой связи возникает необходимость совершенствования компьютерных комплексов мониторинга и диагностики основного оборудования АЭС. Указанные объективные факторы придали особую остроту актуальному требованию интеллектуализации функций этих систем на основе разработки нового - интеллектуального - поколения технических средств обеспечения эффективной автоматической диагностики основного оборудования АЭС.

В этой проблеме определяющими являются следующие принципиальные аспекты. Во-первых, перспективные интеллектуальные диагностические средства призваны обеспечить раннее автоматическое обнаружение и распознавание аномальных и предаварийных режимов эксплуатации в наиболее ответственных с точки зрения безопасности АЭС элементах и системах ядерного энергоблока. При этом автоматическая диагностика должна быть обеспечена в условиях формирования начальных фаз возникновения таких нештатных теплогидравлических процессов (ТГП), как начало кипения и кризис теплоотдачи, высокочастотная колебательная неустойчивость реакторных каналов и др. Во-вторых, интеллектуальные системы диагностики призваны обеспечить автоматическое формирование диагностических решений в сложных условиях информационной неопределенности. Такая неопределенность может быть обусловлена не только стохастической природой диагностируемых ТГП, нейтроннофизических, вибрационных и других процессов, но также и вероятностным характером взаимосвязи между ними и возможными эксплуатационными нарушениями в оборудовании. Кроме того, получение априорной статистической информации о некоторых аварийных ТГП, возникновение которых возможно в АкЗ, может быть существенно ограничено.

Сформулированные проблемы обеспечения безопасности ядерных энергетических установок могут быть решены путем создания перспективных интеллектуальных диагностических систем - важнейшего компонента компьютерных комплексов систем поддержки операторов для строящихся и модернизируемых АЭС. Следует отметить, что они принципиально не могут быть реализованы в рамках используемых в настоящее время детерминированных подходов к разработке систем контроля технологических процессов в атомной энергетике. Разработка подобных систем возможна лишь с использованием методологических подходов современной теории искусственного интеллекта.

Анализ наиболее важных функциональных требований, предъявляющихся к рабочим алгоритмам новых систем диагностики оборудования АЭС, позволяет сформулировать их следующим образом. Прежде всего речь идет об автоматизации процедур распознавания начальных фаз возникновения аномальных и предаварийных эксплуатационных режимов в АкЗ. Кроме того, надежная идентификация аномальных и предаварийных режимов эксплуатации основного оборудования АЭС должна быть обеспечена в реальном масштабе времени (on-line), причем в условиях, когда существующими штатными диагностическими системами эти потенциально опасные эксплуатационные состояния еще не могут быть обнаружены.

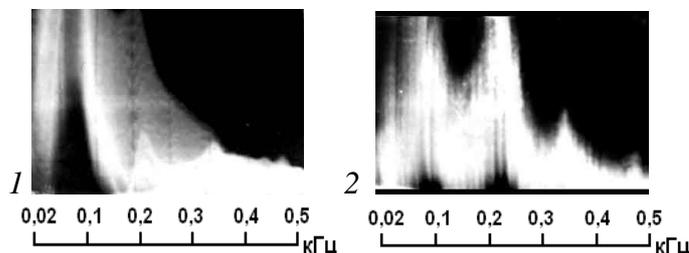
В этой связи объективной оценке и достоверному учету подлежат следующие определяющие факторы и обстоятельства. Как известно, стохастический характер сигналов датчиков технологических параметров ядерных реакторов, используемых СВРК, обусловлен вероятностной природой ТГП и нейтронных процессов в АкЗ. Случайная структура нейтронного потока, давления, температуры и др. физически проявляется в наличии шумовых флуктуационных составляющих этих сигналов на выходе измерительных каналов. В то же время все без исключения компьютерные комплексы современных СВРК в реализуемых ими процедурах контроля и мониторинга используют только детерминированные принципы, основанные на логике бинарного типа. Указанные процедуры имеют целью не допустить выхода интегрального уровня каждого из параметров за предельные пороговые значения. При функционировании существующих систем контроля АкЗ флуктуационные составляющие сигналов датчиков нейтронного потока, давления, температуры теплоносителя подвергаются частотной фильтрации, амплитудной дискриминации, усреднению и другим операциям, в результате которых вероятностная структура этих стохастических сигналов утрачивается. При этом безвозвратно утрачивается и ценная диагностическая информация, изначально содержавшаяся в «реакторных шумах». Иными словами, значительные ресурсы применяемых вычислительных систем СВРК используются, главным образом, для накопления данных контроля технологических параметров и последующего их представления оперативному персоналу для оценки и анализа. В этих условиях диагностические решения об эксплуатационных режимах и реальном состоянии АкЗ, формируются операторами БЩУ эвристически, т. е. с учетом

накопленных знаний, эксплуатационного опыта, а также требований регламента эксплуатации и нормативных документов.

Необходимо констатировать, что в настоящее время, несмотря на появление человеко-машинных интерфейсов с улучшенными эргономическими характеристиками, имеет место высокий, близкий к предельно допустимому, уровень информационной нагрузки операторов БЩУ. Как известно, в стрессовых состояниях, сопровождающих нештатные ситуации управления ядерным энергоблоком, скорость восприятия данных человеком-оператором существенно снижается. С этих позиций требование автоматизации процедур формирования диагностических решений, подлежащих реализации техническими средствами СВРК нового поколения, следует считать одним из приоритетных. Функциональное ядро указанных диагностических процедур должны составить алгоритмы автоматического распознавания начальных фаз возникновения аномальных и аварийных ТГП в АкЗ.

С учетом специфики задач диагностики этих процессов в АкЗ следует констатировать, что при решении комплекса сформулированных проблем информационного обеспечения безопасной эксплуатации АЭС приоритет методологии искусственного интеллекта в настоящее время альтернативы не имеет.

Подтверждением изложенных тезисов может служить нижеприведенные данные анализа реальных физических причин Чернобыльской катастрофы, выполненного на основе разрабатываемого интеллектуального диагностического подхода. На рисунке в качестве примера представлено сравнение двух типов реальных спектральных структур эксплуатационного акустического шума в одном из каналов АкЗ реактора РБМК-1000 энергоблока № 1 ЧАЭС, зарегистрированного одним из авторов настоящей статьи до аварии в процессе реакторных экспериментов. Ядерно-физические и теплогидравлические условия, в которых произведены измерения, были практически полностью (за исключением оперативного запаса реактивности) подобны нерегламентному эксплуатационному состоянию энергоблока № 4 непосредственно перед аварией.



Сопоставление частотных структур спектров акустического шума, зарегистрированного в условиях отсутствия кипения в тепловыделяющем канале (спектр 1) и в режиме генерации паровой фазы в результате срабатывания аварийной защиты АЗ-5 (спектр 2).

Спектр 1 соответствует условиям отсутствия процесса кипения в реакторном канале перед срабатыванием защиты АЗ-5. Гармонические спектральные составляющие акустического шума в канале обусловлены исключительно низкочастотным фоном циркуляционных насосов, а структура спектра диагностического сигнала свидетельствует об отсутствии процесса генерации паровой фазы на поверхности ТВЭЛ.

Спектр 2 соответствует структуре диагностического сигнала, зарегистрированного на 5-й секунде после срабатывания АЗ-5 при плановой остановке реактора энергоблока № 1. Его отличает наличие характерных спектральных составляющих в частотном диапазоне 0,1...0,5 кГц, свидетельствующих о начале генерации пара. Эта спектральная структура полностью соответствует многим подобным, полученным при стендовых экспериментах на стадии активации первых центров парообразования в модельных тепловыделяющих сборках с имитаторами ТВЭЛ.

Приведенное сопоставление полностью подтверждает уже общепризнанное мнение о первопричине катастрофы, начальном событии, непосредственно инициировавшем аварийный разгон реактора энергоблока № 4. Можно считать окончательно доказанным, что им стало именно начало кипения теплоносителя в тепловыделяющих каналах при остановке реактора, произошедшее на фоне наличия нерегламентного оперативного запаса реактивности

вследствие конструктивных недостатков и ошибок, допущенных при проектировании стержневой АЗ реакторов РБМК-1000 первого поколения (уменьшенная длина графитового вытеснителя поглощающего стержня). В отличие от реактора энергоблока № 1 ЧАЭС, группа каналов которого была оборудована разработанными акустическими сенсорами и системой диагностики режимов кипения в ТВС, ни один из каналов аналогичного реактора энергоблока № 4 таких диагностических средств не имел. Поэтому в условиях присущего реакторам РБМК-1000 первого поколения значительного положительного парового коэффициента реактивности, могущего достигать $5\beta_{эф}$, оперативный персонал энергоблока № 4 не имел диагностического предупреждения о возможности разгона реактора на быстрых нейтронах в указанных ядерно-физических и теплогидравлических условиях при срабатывании АЗ-5 и начале кипения теплоносителя в тепловыделяющих каналах.

Таким образом, разработка методологических основ создания интеллектуальных компьютерных диагностических систем, предназначенных для раннего автоматического обнаружения и распознавания указанных выше предаварийных и аномальных ТПП путем анализа шумов технологических параметров в АКЗ водоохлаждаемых ядерных реакторов, является нерешенной до настоящего времени актуальной научной проблемой, которая имеет неоспоримое практическое значение для реализации комплексной проблемы повышения уровня эксплуатационной безопасности ядерных энергоблоков АЭС. Решению указанной научной проблемы посвящены работы, выполняемые в отделе надежности теплотехнического оборудования АЭС.

ПРІОРИТЕТНІ НАПРЯМКИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ПРОБЛЕМ БЕЗПЕКИ АТОМНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

А. А. Ключников, І. Г. Шарасєвський, Н. М. Фіалко, Л. Б. Зімін

Розглянуто пріоритетні напрямки досліджень та розробок, що виконуються у відділі надійності теплотехнічного обладнання ядерних реакторів. Критично проаналізовано відомі методи діагностики та контролю процесів генерації парової фази у реакторах, що охолоджуються водою. Проаналізовано задачі розробки діагностичної системи нового покоління на основі інтелектуального програмного забезпечення.

Ключові слова: теплогідравлічні процеси, інтелектуальна діагностика.

PRIORITY RESEARCHES' DIRECTIONS OF THERMAL SAFETY PROBLEMS FOR NUCLEAR POWER PLANTS

O. O. Klychnykov, I. G. Sharaevsky, N. M. Fialko, L. B. Zimin

Priority researches' and development's directions, which are performed by the heating equipment for nuclear reactors' safety department were reviewed. The well-known methods of diagnostics and controls of a vapor phase generating process in water-cooled nuclear reactor were critically analyzed. The tasks of developing a new generation of diagnostic systems based on predictive software were analyzed.

Keywords: thermohydraulic process, intelligent diagnostics.

Поступила в редакцію 14.02.11