

А. В. Носовский, И. Г. Шараевский, Н. М. Фиалко, Л. Б. Зимин, Г. И. Шараевский

Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, ул. Лысогорская, 12, Киев, 03028, Украина

АКТУАЛЬНЫЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РЕСУРСОМ ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГОБЛОКОВ АЭС

Представлены результаты комплексного анализа нерешенных теплофизических проблем управления ресурсом ядерных энергоблоков АЭС с водо-водяными реакторами типа ВВЭР. Определены актуальные направления качественного совершенствования систем диагностики и прогноза реального технического состояния элементов и систем ядерных реакторов с целью обеспечения возможности продления их ресурса. Рассмотрен комплекс определяющих физических, технических и диагностических факторов, подлежащих учету при разработке нового поколения диагностических систем для раннего автоматического обнаружения начальных фаз потенциально опасных отклонений параметров теплогидравлических режимов активных зон от регламентируемых значений.

Ключевые слова: управление ресурсом, ядерный энергоблок, теплогидравлический режим, шумы технологических параметров, распознавание аномалий.

Современный этап развития атомной энергетики поставил на повестку дня обширный комплекс неотложных научно-технических вопросов, которые требуют своего приоритетного решения и тесно связаны с реализацией актуальной для ядерной энергетической отрасли проблемы эффективного управления ресурсом основного оборудования действующих и проектируемых АЭС. Значительная часть этих актуальных технологических проблем, которые рассматриваются с позиций современных теплофизических приоритетов повышения эксплуатационной надежности ТВЭЛ энергетических ядерных реакторов (ЯР) проанализирована в монографии [1]. Другие аспекты указанной проблематики, рассматриваемые в контексте перспективных подходов к обеспечению безопасности активной зоны (АкЗ) и других ответственных элементов первого контура ядерных энергетических установок (ЯЭУ), всесторонне рассмотрены в последующих монографиях [2 - 4] в рамках выполняемого в ИПБ АЭС НАН Украины цикла работ «Теплофизика безопасности АЭС». Показательно, что в числе рассматриваемых в широком контексте в монографиях [1 - 4] приоритетных направлений исследований и разработок в комплексной проблеме повышения надежности, безопасности, а также эффективного управления ресурсом основного оборудования ЯЭУ теплофизические аспекты качественного совершенствования диагностического обеспечения эксплуатации ядерных энергоблоков занимают особое место. Вместе с тем, в указанных работах отсутствует системный анализ актуальной проблематики и перспективных направлений управления ресурсом ядерных энергоблоков, основанных на новых информационных технологиях. Так, наряду с актуальной проблематикой вопросов расчета и прогнозирования режимов аномального и аварийного теплосъема в АкЗ водоохлаждаемых ядерных реакторов (ВОЯР), требуют своего отражения также и вопросы практически неконтролируемой в настоящее время колебательной динамики первого контура, а также комплекс вопросов методологии раннего автоматического распознавания потенциально опасных нештатных теплофизических режимов реакторных установок (РУ) на основе методологии искусственного интеллекта (ИИ). В этой связи следует отметить, что именно выработка эффективных подходов к решению сформулированных выше проблемных задач, которые оцениваются в настоящее время как одни из наиболее приоритетных в современной атомной энергетике (это отмечается, в частности, в ряде работ, таких, например, как недавняя публикация [5]), имеет ключевое значение для успешной реализации комплексной проблемы повышения эксплуатационной безопасности, надежности, а также эффективного управления ресурсом действующих и проектируемых АЭС.

Как известно [5 и др.], традиционными направлениями управления ресурсом оборудования ядерных энергоблоков в процессе их эксплуатации были и остаются неразрушающий контроль структурных элементов ЯЭУ и определение фактического состояния металла этих элементов. Указанные направления достаточно подробно освещены в имеющейся литературе (см., например, монографию [6]) и (в силу этого обстоятельства) стали восприниматься многими специалистами отрасли в качестве фундаментальной и единственно возможной основы такой достаточно новой области знаний, какой являются составляющие ее фактическое ядро современные технологии управления ресурсом оборудования ядерных энергоблоков. Вместе с тем в последние три десятилетия особую актуаль-

© А. В. Носовский, И. Г. Шараевский, Н. М. Фиалко, Л. Б. Зимин, Г. И. Шараевский, 2017

ность в данной области приобрели новые направления исследований и разработок, которые составляют основу комплекса проблемных вопросов, тесно связанных с актуальными задачами научно-технического обеспечения комплекса технологий и мероприятий по продлению ресурса АЭС. В особой мере изложенное следует отнести к современной теплофизической проблематике диагностического обеспечения эксплуатации АкЗ ВОЯР.

Кроме того, известно [1 - 4], что разрушение оболочек ТВЭЛ при возникновении на их теплоотдающей поверхности кризиса теплоотдачи при кипении теплоносителя создает реальную угрозу эксплуатационной безопасности реакторов ВВЭР, а также других типов водоохлаждаемых энергетических РУ. В то же время, несмотря на потенциальную опасность появления этого аварийного по теплосъему состояния АкЗ, аномальные и предаварийные теплофизические процессы в их тепловыделяющих сборках (ТВС), которые связаны, например, в реакторах ВВЭР с началом генерации паровой фазы на поверхности ТВЭЛ, современными техническими средствами мониторинга и диагностики РУ фактически не могут быть идентифицированы. В первую очередь это касается нештатных теплогидравлических процессов (ТГП), которые реализуются в АкЗ при последующем увеличении плотности активных центров парообразования и развитии пузырькового кипения на этой поверхности теплосъема вплоть до наступления кризиса теплоотдачи. Определяющим в этой связи является тот факт, что существующими средствами технологического контроля АкЗ современных РУ указанные теплогидравлические режимы принципиально не могут быть обнаружены. Указанные функциональные ограничения присущи не только применяемым в настоящее время в практике эксплуатации водородных ЯР, а также энергетических реакторов кипящего типа техническим средствам термометрии АкЗ, но также и функциональным возможностям современных компьютерных комплексов мониторинга других технологических параметров РУ. Как известно [5 и др.], функционирование в структуре штатных технических средств АСУ ТП АЭС (СВРК, КИПиА, СПО и др.), наряду с температурными измерениями, обеспечивает контроль нейтронного потока, давления теплоносителя, а также ряда других определяющих процесс управления ЯЭУ важнейших оперативных данных. При этом реальное отсутствие в структуре современных АСУ ТП АЭС таких специализированных технических средств, которые были бы способны обеспечить эффективный контроль режимов генерации паровой фазы при кипении теплоносителя на поверхности ТВЭЛ (включая возможность раннего автоматического обнаружения непосредственно предшествующих кризису теплоотдачи предаварийных теплофизических процессов в ТВС), существенно снижает уровень эксплуатационной надежности ядерных энергоблоков современных АЭС с ВОЯР некипящего и кипящего типа.

С этих позиций, рассматриваемых в контексте анализа путей решения фактически нерешенной до настоящего времени проблемы создания общей методологии оперативного контроля нерегламентных теплофизических процессов в АкЗ отечественных (ВВЭР, РБМК) и зарубежных (PWR, BWR) РУ, в последние годы было установлено, что стохастические флуктуационные составляющие сигналов датчиков ряда технологических параметров АкЗ ЯР, в первую очередь давления, нейтронного потока, гидравлического сопротивления и др. (т.е. «реакторные шумы»), содержат значимую диагностическую информацию о характере процесса фазового перехода на теплоотдающей поверхности ТВЭЛ. Показательно, что в силу несоответствия применяемых в настоящее время методов детерминированного контроля ТГП в АкЗ ЯР реальной вероятностной природе вышеуказанных «реакторных шумов» ценная диагностическая информация, которая содержится во флуктуационных составляющих сигналов датчиков давления, нейтронного потока, гидравлического сопротивления и др., в настоящее время реально утрачивается. При этом с учетом сформулированных выше проблемных задач управления ресурсом АкЗ реакторов основных энергетических типов необходимо особо отметить, что наиболее важной функцией диагностического обеспечения эксплуатации РУ, которая подлежит приоритетной разработке при создании нового поколения технических средств оперативной диагностики ЯЭУ, являются процедуры раннего автоматического распознавания предаварийных и аномальных режимов теплосъема в ТВС водоохлаждаемых энергетических ЯР. Определяющим при этом является тот факт, что реализация указанного функционала принципиально должна быть обеспечена на основе информации, содержащейся в информационно значимых реакторных шумах. В этой связи следует также подчеркнуть, что автоматическое распознавание физически нечетких (в силу их вероятностной природы) предаварийных и аномальных теплофизических процессов, являющихся диагностическими объектами, должно быть обеспечено не только с высокой надежностью их правильной идентификации, но и в реальном масштабе времени. При этом с учетом отмеченных выше принципиальных особенностей подлежащей решению проблемной задачи оперативного контроля теплофизических процессов в АкЗ ВОЯР, а также в контексте составляющих ядро этой проблемы опреде-

ляющих функциональных требований, которые предъявляются в настоящее время ко всем подлежащим разработке перспективным техническим средствам шумовой диагностики режимов эксплуатации ЯЭУ, должны быть особо отмечены следующие фундаментальные аспекты этой проблемы.

Прежде всего, разработку комплекса математических моделей и методов для автоматического распознавания предаварийных и аномальных теплофизических процессов на теплоотдающей поверхности ТВЭЛ по шумам технологических параметров РУ, а также создание эффективных программно-технических средств для компьютерной реализации этих моделей и диагностических методов следует считать актуальной и подлежащей неотложному решению научной проблемой.

Кроме того, необходимо подчеркнуть, что в последние годы при обеспечении фундаментальных функций безопасности [7 - 9] операторы блочных щитов управления (БЩУ) ядерных энергоблоков (в особенности большой мощности) столкнулись не только с существенным усложнением характера эксплуатационных задач, но также с острым дефицитом времени для выработки диагностических и управляющих решений. Именно в этом технологическом контексте объективно возникла необходимость кардинального пересмотра существующих детерминированных подходов к разработке и созданию компьютерных комплексов диагностики основного оборудования ЯЭУ, которые должны быть предназначены для функционирования в структуре технических средств СПО АЭС. Как подчеркивается в этой связи в ряде работ, таких, например, как [10 - 14], которые одними из первых конкретизировали проблематику качественного совершенствования существующих специализированных вычислительных систем для информационной поддержки оперативного персонала ядерных энергоблоков, указанные объективные факторы придали особую остроту актуальному требованию интеллектуализации функций этих систем. Показательно, что решение этой задачи, как было впервые отмечено в этих работах около 30 лет назад, должно быть обеспечено именно на основе разработки нового - интеллектуального - поколения технических средств, призванных обеспечить эффективную автоматическую диагностику основного оборудования АЭС.

С позиций выработки концептуальных подходов к решению вышеуказанной проблемы качественного совершенствования диагностического обеспечения эксплуатации ядерных энергоблоков в качестве определяющих должны быть конкретизированы следующие принципиальные условия решения связанных с этой проблемой актуальных задач оперативной диагностики. Во-первых, перспективные интеллектуальные диагностические средства должны обеспечить раннее автоматическое обнаружение, а также надежное распознавание аномальных и предаварийных режимов эксплуатации в наиболее ответственных с точки зрения безопасности АЭС элементах и системах ядерного энергоблока. При этом автоматическая диагностика указанных элементов и систем АЭС должна быть обеспечена в условиях возникновения именно начальных фаз появления нештатных эксплуатационных состояний в диагностируемых элементах основного оборудования ЯЭУ. Во-вторых, интеллектуальные системы диагностики нового поколения должны реализовывать автоматическое формирование диагностических решений в сложных для оперативного персонала ядерного энергоблока условиях информационной неопределенности. При этом основная сложность состоит в том, что такая неопределенность может быть обусловлена не только стохастической природой диагностируемых нейтронно-физических, теплогидравлических, вибрационных и других процессов, но также и вероятностным характером взаимосвязи между этими процессами и возможными эксплуатационными нарушениями в оборудовании. В этих условиях получение априорной статистической информации о ряде аварийных технологических процессов (в особенности, теплогидравлических), возникновение которых возможно в критических для надежности элементах и системах АКЗ энергетических ЯР, может быть ограничено.

Определяющим в свете вышеуказанных фундаментальных проблем обеспечения эксплуатационной безопасности АЭС является тот факт, что их эффективная реализация должна быть обеспечена именно на основе создания перспективных интеллектуальных диагностических систем, которые в настоящее время рассматриваются специалистами [8, 12 - 14] в качестве важнейшего - системообразующего - элемента перспективных компьютерных комплексов СПО АЭС нового поколения. Таким образом, требование их создания фактически обусловлено очевидной необходимостью качественного совершенствования информационной поддержки оперативного персонала ядерных энергоблоков. Очевидно, что создание этих программно-технических средств оперативной диагностики нового поколения не может быть реализовано в рамках используемых в настоящее время детерминированных подходов к разработке систем контроля технологических процессов в атомной энергетике [7,

15, 16, 18]. При этом [10 – 14, 17, 19] разработка подобных систем может быть реализована исключительно на основе использования методологических подходов современной теории ИИ.

Таким образом, перспективные концепции качественного совершенствования информационной поддержки оперативного персонала ЯЭУ должны учитывать необходимость автоматизации процедур формирования диагностических решений о техническом состоянии критически важного оборудования ядерного энергоблока. Именно об этом свидетельствуют результаты системного анализа наиболее важных функциональных требований, предъявляемых к алгоритмам функционирования технических средств нового поколения диагностических систем оборудования АЭС, которые изложены в работах [8, 12 - 14]. Указанные результаты позволяют конкретизировать следующие функциональные особенности подлежащих разработке перспективных диагностических средств:

автоматическое распознавание начальных фаз возникновения аномальных и предаварийных эксплуатационных режимов в основном оборудовании ЯЭУ, включая АкЗ энергетических ЯР, а также в других критически важных с точки зрения обеспечения безопасности АЭС элементах и системах ядерного энергоблока;

надежная идентификация в реальном масштабе времени (on-line) аномальных и предаварийных режимов эксплуатации основного оборудования ЯЭУ, включая РУ, в условиях, когда штатными системами КИПиА ядерного энергоблока эти потенциально опасные эксплуатационные состояния еще не могут быть обнаружены.

При этом объективной оценке подлежат следующие факторы и условия создания таких перспективных диагностических средств:

1. Как известно [20 - 22], стохастический характер сигналов датчиков технологических параметров ЯР, которые поступают на входы СВРК, а также других подсистем АСУ ТП АЭС, включая технические средства мониторинга и диагностики оборудования ЯЭУ, обусловлен вероятностной природой нейтронных и теплогидравлических процессов в элементах и системах РУ. При этом случайная структура указанных технологических параметров - нейтронного потока, давления, температуры и др. - физически проявляется в наличии шумовых флуктуационных составляющих этих сигналов на выходе измерительных каналов для их контроля.

2. Практически все существующие вычислительные системы в структуре применяемых в настоящее время технических средств АСУ ТП АЭС, включая компьютерные комплексы СВРК и СПО, в реализуемых ими современных процедурах оценки характера текущих значений важнейших технологических параметров используют исключительно детерминированные принципы, основанные на логике бинарного типа и булевой алгебре [15, 16, 18]. Показательно, что указанные процедуры контроля призваны не допустить выхода интегрального уровня каждого из технологических параметров за предельные пороговые значения, устанавливаемые на основании требований регламента эксплуатации и опыта технического обслуживания ЯЭУ данного типа.

3. Флуктуационные составляющие сигналов датчиков нейтронного потока, давления, температуры теплоносителя в АкЗ энергетических ЯР, а также в других элементах и системах основного оборудования ядерных энергоблоков, в соответствии с действующими детерминированными алгоритмами контроля уровней сигналов датчиков КИПиА, в соответствии с существующими подходами к обработке сигналов датчиков технологических параметров ЯЭУ подвергаются (как это подчеркивается, например, в работах [15, 16]) частотной фильтрации, амплитудной дискриминации, усреднению и некоторым другим операциям, в результате которых вероятностная структура этих стохастических сигналов фактически утрачивается. При этом, как отмечено выше, безвозвратно теряется также и ценная диагностическая информация, изначально содержащаяся в вышеуказанных «реакторных шумах» (т. е. во флуктуационных составляющих таких важнейших сигналов технологических параметров ЯЭУ, как нейтронный поток, давление, температура и др.) [20, 21, 23, 24].

4. Ресурсы существующих вычислительных систем, которые функционируют в структуре СПО АЭС и реализуют вышеуказанные детерминированные функции оценки текущих значений технологических параметров ЯЭУ, в настоящее время используются только для накопления данных контроля технологических параметров, а также последующего их представления оперативному персоналу для эвристической оценки и анализа. Характерно, что фундаментальные диагностические решения об эксплуатационных режимах, а следовательно, и реальном техническом состоянии оборудования, включая АкЗ ЯР, формируются операторами БЩУ именно эвристически (т. е. с учетом накопленных знаний, их эксплуатационного опыта, а также существующих требований регламента эксплуатации и нормативных документов). Очевидно, что для подобной «ручной» выработки этих решений исполь-

зуются соответствующие человеко-машинные интерфейсы, которые в целом являются несомненно эргономически оправданными и целесообразными при представлении массивов текущих значений технологических параметров ядерного энергоблока, однако в информационном плане существенно перегружают персонал ЯЭУ.

5. Сложность конструкции отечественных и зарубежных ЯЭУ, оснащенных реакторами основных энергетических типов обуславливает необходимость контролировать примерно около 20000 значений текущих технологических параметров, формируемых первичными преобразователями, а также выполнять значительное количество ядерно-физических, теплогидравлических и других расчетов. Так, например, опыт первых месяцев эксплуатации в штатном режиме пилотного образца реактора ВВЭР-1000 (в свое время являвшегося одним из наиболее совершенных) убедительно показал, что даже для квалифицированного и хорошо подготовленного оперативного персонала выполнение всех действий, предусмотренных регламентом эксплуатации, действительно находится на пределе физиологических возможностей человека. Показательно, что высокий, близкий к предельно допустимому, уровень информационной нагрузки операторов БЩУ имеет место и сегодня, несмотря на существенно улучшенные эргономические характеристики человеко-машинных интерфейсов (включая технические средства SPDS), которые в последние годы стали широко применяться в компьютерном оснащении БЩУ современных АЭС [8, 9, 11, 25, 26]. Показательно, что анализ причин серьезных ядерных аварий, имевших место в атомной энергетике за последние годы [8, 27], включая Чернобыльскую катастрофу и тяжелые повреждения ЯЭУ на АЭС Фукусима, свидетельствует о критической важности именно человеческого фактора в проблеме обеспечения безопасности АЭС. Исследования надежности человека-оператора БЩУ [8, 28, 29], рассматриваемого как лицо, непосредственно принимающее диагностические и управляющие решения, показали, что он является наименее надежным звеном в любой современной АСУ ТП АЭС эргатического (человеко-машинного) типа. Эти данные неопровержимо свидетельствуют о недостаточной надежности и устойчивости именно этого ключевого звена обеспечения безопасности и ресурса ЯЭУ.

6. Как известно [30, 31], возможности человеческого организма по восприятию и обработке поступающей извне информации весьма ограничены и определяются в первую очередь такими физиологическими характеристиками, как скорость реакции, степень концентрации внимания, память и др. Так, например, можно считать окончательно установленным [8, 11], что максимальная способность к оценке оперативных данных у человека-оператора, рассматриваемого как информационный канал, в условиях штатной эксплуатации не превышает 44 бит/с, т.е. является недостаточно высокой даже при отсутствии у него психологического стресса. В стрессовых состояниях, сопровождающих все нештатные ситуации управления ядерным энергоблоком, скорость восприятия данных человеком-оператором существенно снижается, достигая недопустимых значений, обычно не превышающих 0,5 бит/с при одновременном сокращении поля информационного обзора, которое включает приборные панели и видеотерминалы БЩУ. Естественно, что в силу этого обстоятельства психофизиологические параметры и информационные характеристики человека-оператора не могут быть признаны удовлетворительными не только с точки зрения высокой вероятности пропуска (особенно в нештатных ситуациях) оперативных данных, критически важных для безопасности АЭС, но и с позиций обеспечения своевременной и адекватной реакции на динамично изменяющуюся в условиях развивающейся аварии на АЭС обстановку.

7. С учетом недостаточной надежности и устойчивости человека-оператора, непосредственно участвующего в функционировании вышерассмотренных эргатических человеко-машинных компьютерных комплексов, требование автоматизации процедур формирования диагностических решений, подлежащих реализации техническими средствами СПО АЭС нового поколения, признано специалистами по безопасности и ресурсу АЭС одним из наиболее приоритетных. Таким образом, функциональное ядро указанных диагностических процедур должны составить именно алгоритмы автоматического распознавания наиболее ранних, т.е. начальных фаз возникновения аномальных и аварийных эксплуатационных режимов в критических элементах конструкции ЯЭУ. Как следует из вышеизложенного, существующие детерминированные алгоритмы контроля технологических параметров ядерного энергоблока принципиально не способны обеспечить надежную идентификацию нештатных режимов эксплуатации АкЗ ЯР, а также других элементов и систем основного оборудования АЭС. Очевидно, что они не позволяют учесть и практически использовать ценную диагностическую информацию, которая содержится в стохастических флуктуационных составляющих сигналов датчиков технологических параметров ЯЭУ.

Показательно, что необходимость эффективного решения вышеуказанных диагностических задач на принципиально новой, существенно более совершенной, чем существующие детерминированные подходы, методологической основе убедительно аргументируется также в работах [12 – 14, 23 – 25, 28, 29]. При этом с учетом специфики задач диагностики АкЗ РУ и ряда других элементов и систем ядерного энергоблока можно с уверенностью констатировать, что при решении комплекса сформулированных проблемных вопросов, которые связаны с обеспечением информационной безопасности процесса эксплуатации АЭС, приоритет концептуальных подходов теории распознавания образов [32], рассматриваемых в контексте общей методологии ИИ [17, 19], альтернативы не имеет.

Представленный выше системный анализ основной проблематики создания интеллектуальных систем оперативной диагностики нового поколения, рассмотренный в контексте фундаментальной проблемы управления ресурсом современных АЭС позволяет констатировать следующее:

а) в настоящее время в атомной энергетике ведущих стран мира практически отсутствуют специализированные диагностические системы, а также другие программно-технические средства, функционирующие в структуре СВРК, КИПиА, СПО, АСУ ТП АЭС, которые способны обеспечить надежное автоматическое распознавание предаварийных и аномальных режимов теплосъема с теплоотдающей поверхности ТВЭЛ на основании информации, содержащейся в шумах технологических параметров в АкЗ ВОЯР;

б) существующие технические средства контроля технологических параметров АкЗ и режимов эксплуатации ВОЯР, включая компьютерные комплексы СВРК, а также системы мониторинга основного оборудования ЯЭУ (такие, например, как SPDS, ALLY, pwVDN (США); KUS'95, PCSUS (ФРГ), DMS, PODIA (Япония), СКУД (Россия) и др.), не обеспечивают возможности автоматического распознавания предаварийных условий перехода штатного режима теплосъема к одному из наиболее опасных видов аварийных процессов - кризису теплоотдачи при кипении теплоносителя на теплоотдающей поверхности ТВЭЛ [12 – 16, 23, 24, 26];

в) использование существующих технических средств контроля, мониторинга и диагностики АкЗ ВОЯР не обеспечивает обнаружения и надежной идентификации аномальных теплофизических процессов в ТВС указанных реакторов, а именно начала кипения на теплоотдающей поверхности ТВЭЛ (проблемы обнаружения этого теплогидравлического режима на поверхности ТВЭЛ рассмотрены, например, в работе [33]) и высокочастотной колебательной неустойчивости теплоносителя (характерные физические особенности основных видов неустойчивости двухфазного потока в ПК систематизированы, в частности в монографиях [4, 28]);

г) до настоящего времени фактически не разработаны фундаментальные подходы, а также необходимые методологические основы создания нового, а именно - интеллектуального - поколения специализированных диагностических систем, которые способны надежно обеспечить автоматическое распознавание предаварийных и аномальных ТГП в АкЗ ВОЯР.

Таким образом, разработка методологии создания интеллектуальных диагностических систем, которые предназначены для раннего автоматического обнаружения и надежного распознавания предаварийных и аномальных ТГП на основе идентификации шумов технологических параметров АкЗ ВОЯР, является перспективной, однако фактически нерешенной до настоящего времени актуальной научной проблемой, которая в контексте реализации комплексной проблемы управления ресурсом оборудования ядерных энергоблоков АЭС является очевидным приоритетом. Другие практические аспекты проблематики управления ресурсом ЯЭУ рассматриваются в последующих статьях авторов.

СПИСОК ИПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Теплофизика безопасности атомных электростанций* / А. А. Ключников, И. Г. Шараевский, Н. М. Фиалко и др. – Чернобыль : Ин-т проблем безопасности АЭС НАН Украины, 2010. – 484 с. – ISBN 978-966-02-5763-4 (серия), ISBN 978-966- 02-5814-3.
2. *Теплофизика аварий ядерных реакторов* / А. А. Ключников, И. Г. Шараевский, Н. М. Фиалко и др. - Чернобыль : Ин-т проблем безопасности АЭС НАН Украины НАН Украины, 2012. – 528 с. – ISBN 978-966-02-5763-4 (серия), ISBN 978-966- 02-6194-5.
3. *Теплофизика повреждений реакторных установок* / А. А. Ключников, И. Г. Шараевский, Н. М. Фиалко и др. - Чернобыль : Ин-т проблем безопасности АЭС НАН Украины, 2013. – 528 с. – ISBN 978-966-02-5763-4 (серия), ISBN 978-966- 02-6815-9.
4. *Теплофизика надежности активных зон* / А. А. Ключников, И. Г. Шараевский, Н. М. Фиалко и др. - Чернобыль : Ин-т проблем безопасности АЭС НАН Украины НАН Украины, 2015. – 772 с. – ISBN 978-966-02-5763-4 (серия), ISBN 978-966- 02-7339-9 (кн. 4).

5. *Рясный С. И.* Управление ресурсом оборудования при инженерной поддержке эксплуатации АЭС / С. И. Рясный // Теплоэнергетика. – 2015. - № 5. – С. 39 – 43.
6. *Коллакот Р. А.* Диагностика повреждений : пер. с англ. / Р. Коллакот; под ред. П. Г. Бабаевского. - М. : Мир, 1989. - 516 с.
7. *Самойлов О. Б.* Безопасность ядерных энергетических установок / О. Б. Самойлов, Г. Б. Усынин, А. М. Бахметьев. - М.: Энергоатомиздат, 1989. - 279 с.
8. *Malone T. B.* Human factors Evaluation of Control Room Design and Operation Performance at Three Mile Island 2 / T. B. Malone et al. – Alexandria. Virg.: Essex Corp., US NRC, NUREG/CR-1270, 1980. – P. 432 - 441.
9. *Сааков Э. С.* Подготовка эксплуатационного персонала для АЭС / Э. С. Сааков, А. В. Ревин, В. А. Ефрюшкин. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 96 с.
10. *Острейковский В. А.* Физико-статистические модели надежности элементов ЯЭУ / В. А. Острейковский. - М. : Энергоатомиздат, 1986. - 312 с. – ISBN
11. *Gain D. G.* Review of Trends in Computer side System for Operator Support / D. G. Gain // Nuclear Safety. – 1986. – Vol. 27, No. 4. – P. 161 - 169.
12. *Калинушкин А. Е.* Создание экспертных систем для ядерной энергетики / А. Е. Калинушкин, В. И. Митин, Ю. М. Семченков // Атомная техника за рубежом. – 1990. - Т. 7. – С. 3 - 12.
13. *Куприянова И. А.* Автоматизированные средства информационной поддержки оператора при управлении АЭС. Аналит. обзор / И. А. Куприянова. – Обнинск : ФЭИ, 1987. – 47 с.
14. *Комаревский И. В.* Экспертные системы для поддержки оператора в управлении ЯЭУ / И. В. Комаревский // Атомная техника за рубежом. – 1988. - № 7. – С. 3 - 9.
15. *Королев В. В.* Системы управления и защиты АЭС / В. В. Королев. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 128 с.
16. *Емельянов И. Я.* Управление и безопасность энергетических ядерных реакторов / И. Я. Емельянов, П. А. Гаврилов, Б. И. Селивестров. – М. : Атомиздат, 1975.
17. *Luger G.* Artificial intelligence / G. Luger. – Addison Wesley, UK. – 2002. – 864 p.
18. *Ершов Ю. Л.* Математическая логика / Ю. Л. Ершов, Е. А. Палютин. – М. : Наука, 1987. – 336 с.
19. *Уинстон П.* Искусственный интеллект: пер. с англ. / П. Уинстон. – М. : Мир, 1980. – 519 с.
20. *Некоторые современные методы обработки сигналов при диагностике ЯЭУ / А. И. Могильнер, В. М. Селиванов, В. Г. Гришин и др. // Тр. сем. ТФ-78 «Теплофизические исследования для обеспечения надежности и безопасности ядерных реакторов водо-водяного типа». – Будапешт, 1978. - Т. 2. - С. 853 - 862.*
21. *Уриг Р.* Статистические методы в физике ядерных реакторов : пер. с англ. / Р. Уриг. - М. : Атомиздат, 1974. - 400 с.
22. *Yokobayashi M.* Development of reactor accident diagnostic system DISKET using knowledge engineering technique / M. Yokobayashi, K. Yochida, A. Konsaka // Int. Nucl. Science and Technology. – 1986. – Vol. 23, No. 4. – P. 300 - 314.
23. *Скартон Х. А.* Обзор акустических методов обнаружения кипения в ядерных реакторах / Х. А. Скартон, Д. Ф. Макдональд, У. М. Кэрри // Аэрогидромеханический шум в технике : пер. с англ. ; под ред. Р. Хиклинга. – М. : Мир, 1980. - С. 166 - 198.
24. *Мельников В. И.* Акустические методы диагностики двухфазных потоков в ЯЭУ / В. И. Мельников, Г. Б. Усынин. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 160 с.
25. *Анохин А. Н.* Системы поддержки оператора АЭС / А. Н. Анохин, В. А. Острейковский, Н. Л. Сальников. – Обнинск : Институт атомной энергетики, 1988. - 92 с.
26. *Борисенко В. И.* Внедрение СППБ на АЭС Украины с ВВЭР-1000 / В. И. Борисенко, С. П. Сиренко, С. А. Колесов // Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики. 2-я междунар. конф. - М. : ВНИИАЭС, 22 - 23 марта 2001 г. – Ч. 1. - С. 120 - 127.
27. *Игнатенко Е. И.* Чернобыльская авария и ликвидация ее последствий / Е. И. Игнатенко // Электрические станции. – 1990. - № 9. – С. 24 - 28.
28. *Справочник по атомной энерготехнологии : пер. с англ. ; под ред. В. А. Легасова. - М.: Мир, 1989. - 751 с.*
29. *Tomizawa T.* Enhanced Operational Safety of LWR by Advanced Computer Technology and Human Engineering / T. Tomizawa // Int. symp. Operational safety on Nuclear Power Plant. Marsilles, France, 2 - 6 May 1983. IAEA-SM-268/17. - 34 p.
30. *Шеперд Г.* Нейробиология, т. 2 / Г. Шеперд ; пер. с англ. – М. : Мир, 1987. – 368 с.
31. *Хьюбел Д.* Глаз, мозг, зрение / Д. Хьюбел ; пер. с англ. – М. : Мир, 1990. – 239 с.
32. *Шараевский И. Г.* Возможности совершенствования компьютерных систем контроля АЭС на основе методов искусственного интеллекта / И. Г. Шараевский, Е. Н. Письменный, Е. Д. Домашев // Пром. теплотехника. – 2000. – Т. 22. – № 1. - С. 70 - 77.
33. *Эволюция подходов к определению начала кипения теплоносителя на теплоотдающей поверхности ТВЭЛ / Н. М. Фиалко, И. Г. Шараевский, Л. Б. Зимин, Н. О. Меранова // Проблемы безопасности атомных электростанций і Чернобиля. – 2007. – Вип. 8. – С. 44 - 50.*

А. В. Носовський, І. Г. Шараєвський, Н. М. Фіалко, Л. Б. Зімін, Г. І. Шараєвський

Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, вул. Лисогірська, 12, Київ, 03028, Україна

АКТУАЛЬНІ ТЕПЛОФІЗИЧНІ ПРОБЛЕМИ КЕРУВАННЯ РЕСУРСОМ ЯДЕРНИХ ЕНЕРГОБЛОКІВ АЕС

Наведено результати комплексного аналізу невіршених теплофізичних проблем керування ресурсом ядерних енергоблоків АЕС із водо-водяними реакторами типу ВВЕР. Визначено актуальні напрямки якісного удосконалення систем діагностики та прогнозу реального технічного стану елементів і систем ядерних реакторів з метою забезпечення можливості подовження їхнього ресурсу. Розглянуто комплекс визначальних фізичних, технічних та діагностичних факторів, що підлягають урахуванню під час розробки нового покоління діагностичних систем для раннього автоматичного виявлення початкових фаз потенційно небезпечних відхилень параметрів теплогідрравлічних режимів активних зон від регламентованих значень.

Ключові слова: керування ресурсом, ядерний енергоблок, теплогідрравлічний режим, шуми технологічних параметрів, розпізнавання аномалій.

A. V. Nosovsky, I. G. Sharaevsky, N. M. Fialko, L. B. Zimin, G. I. Sharaevsky

Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants, NAS of Ukraine, Lysogirska str., 12, Kyiv, 03028, Ukraine

CURRENT PROBLEMS THERMOPHYSICAL OF THE NUCLEAR POWER UNITS RESOURCE MANAGEMENT

The results of a comprehensive analysis of unresolved thermal problems of resource management nuclear NPP with water-cooled VVER reactors. Identified current trends in the qualitative improvement of diagnostics and forecasting technical condition of the real elements and nuclear reactor systems in order to ensure the possibility of extending their life. Thermophysical aspects of physical processes that are capable of initiating potentially damaging defects to their elements and systems during the operation of the main energy types reactor installations are considered. Particular attention is paid to the causes of the emergence and development of latent damage in critical elements of the primary circuit critical to the safety of nuclear power plants. The features and the calculation methodology of the corresponding thermohydrodynamic and vibrational processes are analyzed, as well as the principal aspects of the main approaches to early automatic detection of the conditions of nucleation and subsequent development of anomalous and pre-emergency operational states in the elements and systems of active zones and heat exchange equipment of the first circuit of reactor plants. The complex of determining the physical, technical and diagnostic factors to be considered when developing a new generation of diagnostic systems for early automatic detection of the initial phases of potentially dangerous deviations of active zones heat-hydraulic modes parameters from regulated values.

Keywords: resource management, nuclear power, heat-hydraulic mode, noise processing parameters, detection of anomalies.

REFERENCES

1. *Thermophysics of nuclear power plants safety: monography / A. A. Kliuchnykov, I. G. Sharaevsky, N. M. Fialko et al. - Chernobyl: In-t problem bezopasnosti NPP NAS of Ukraine, 2010. - 484 p. – ISBN 978-966-02-5763-4 (book series), ISBN 978-966- 02-5814-3. (Rus)*
2. *Thermophysics of nuclear reactor damages: monography / A. A. Kliuchnykov, I. G. Sharaevsky, N. M. Fialko et al. - Chernobyl: In-t problem bezopasnosti NPP NAS of Ukraine, 2012. - 528 p. – ISBN 978-966-02-5763-4 (book series), ISBN 978-966- 02-6194-5. (Rus)*
3. *Thermophysics of nuclear power units impairments / A. A. Kliuchnykov, I. G. Sharaevsky, N. M. Fialko et al. - Chernobyl: In-t problem bezopasnosti NPP NAS of Ukraine, 2013. – 528 p. – ISBN 978-966-02-5763-4 (book series), ISBN 978-966- 02-6815-9. (Rus)*
4. *Thermophysics of active zones reliability / A. A. Kliuchnykov, I. G. Sharaevsky, N. M. Fialko et al. - Chernobyl: In-t problem bezopasnosti NPP NAS of Ukraine, 2015. – 772 p. – ISBN 978-966-02-5763-4 (book series), ISBN 978-966- 02-7339-9. (Rus)*
5. *Ryasny S. I. Hardware resource management with engineering support NPP / S. I. Ryasny // Teploenergetika. – 2015. - № 5. – P. 39 – 43. (Rus)*
6. *Collakot R. A. Diagnosis of damage : transl. from eng. / R. Collakot; Under ed. P. G. Babaevsky. - Moskwa : Mir, 1989. - 516 p. (Rus)*
7. *Samoilov O. B. The safety of nuclear power plants / O. B. Samoilov, G. B. Usynin, A. M Bakhmet'ev. – Moskwa : Energoatomizdat, 1989. - 279 p. (Rus)*
8. *Malone T. B. Human factors Evaluation of Control Room Design and Operation Performance at Three Mile Island 2 / T. B. Malone et al. – Alexandria. Virg. : Essex Corp., US NRC, NUREG/CR-1270, 1980. – P. 432 - 441.*
9. *Saakov E. S. Preparation of personnel for nuclear power plants exploitation / E. S. Saakov, A. V. Revin, V. A. Efriushkin. – Moskwa : Energoatomizdat, 1987. – 96 p. (Rus)*

10. *Ostrejkovsky V. A.* Physical and statistical models of reliability of nuclear power elements / V. A. Ostrejkovsky. - Moskwa : Energoatomizdat, 1986. - 312 p. (Rus)
11. *Gain D. G.* Review of Trends in Computer side System for Operator Support / D. G. Gain // Nuclear Safety. - 1986. - Vol. 27, No. 4. - P. 161 - 169.
12. *Kalinushkin A. E.* Creating expert systems for nuclear power / A. E. Kalinushkin, V. I. Mitin, Yu. M. Semchenkov // Atomnaya tehnika za rubezhom. - 1990. - Vol. 7. - P. 3 - 12. (Rus)
13. *Kupriyanova I. A.* Automated tools of information support of the operator in the management of nuclear power plants. *Analyt. Rew* / I. A. Kupriyanova. - Obninsk : FEI, 1987. - 47 p. (Rus)
14. *Komahevsky I. V.* Expert systems to support the operator in the management of nuclear power / I. V. Komahevsky // Atomnaya tehnika za rubezhom. - 1988. - № 7. - С. 3 - 9. (Rus)
15. *Korolev V. V.* Control and protection systems of nuclear power plants / V. V. Korolev. - Moskwa : Energoatomizdat, 1986. - 128 p. (Rus)
16. *Emel'ianov I. Ya.* Management and security of nuclear power reactors / I. Ya. Emel'ianov, P. A. Gavrilov, B. I. Seliverstov. - Moskwa : Atomizdat, 1975. (Rus)
17. *Luger G.* Artificial intelligence / G. Luger. - Addison Wesley, UK. - 2002. - 864 p.
18. *Ershov Yu. L.* Mathematical logic / Yu. L. Ershov, E. A. Paliutin. - Moskwa : Nauka, 1987. - 336 p. (Rus)
19. *Uinston P.* Artificial Intelligence. *Transl. from eng* / P. Uinston. - Moskwa : Mir, 1980. - 519 p. (Rus)
20. *Some modern signal processing techniques in the diagnosis of nuclear power* / A. I. Mogil'ner, V. M. Selivanov, V. G. Grishin et al. // Proc. sem. TF-78 «Thermophysical studies to ensure the reliability and safety of nuclear power units of water-water type». - Budapesht, 1978. - Vol. 2. - P. 853 - 862. (Rus)
21. *Urig R.* Statistical methods in physics of nuclear reactors. *Transl. from eng.* / R. Urig. - Moskwa : Atomizdat, 1974. - 400 p. (Rus)
22. *Yokobayashi M.* Development of reactor accident diagnostic system DISKET using knowledge engineering technique / M. Yokobayashi, K. Yochida, A. Konsaka // Int. Nucl. Science and Technology. - 1986. - Vol. 23, No. 4 - P. 300 - 314.
23. *Skarton Kh. A.* Overview of acoustic methods for detecting boiling in nuclear reactors / Kh. A. Skarton, D. F. Makdonald, U. M. Carry // Aerodynamic noise in technology. *Transl. from eng.* ; under ed. R. Khickling. - Moskwa : Mir, 1980. - P. 166 - 198. (Rus)
24. *Mel'nikov V. I.* Acoustic methods of diagnostics of two-phase flow in nuclear power / V. I. Mel'nikov, G. B. Usynin. - Moskwa : Energoatomizdat, 1987. - 160 p. (Rus)
25. *Anokhin A. N.* NPP Operator Support System / A. N. Anokhin, V. A. Ostreikovskiy, N. L. Sal'nikov. - Obninsk: Institut atomnoj energetiky, 1988. - 92 p. (Rus)
26. *Borysenko V. I.* Implementation of the PRSP at the Ukrainian nuclear power plants with VVER-1000 / V. I. Borysenko, S. P. Sirenko, S. A. Kolesov // Safety, efficiency and economics of nuclear energy. Second International Conference. - Moskwa : VNIIAES, 22 - 23 March 2001. - Part 1. - P. 120 - 127. (Rus)
27. *Ignatenko E. I.* The Chernobyl accident and elimination of its consequences / E. I. Ignatenko // Elektricheskie stancii. - 1990. - № 9. - P. 24 - 28. (Rus)
28. *Handbook of nuclear energy technology: transl. from eng.* ; under ed. V. A. Legasov. - Moskwa : Mir, 1989. - 751 p. (Rus)
29. *Tomizawa T.* Enhanced Operational Safety of LWR by Advanced Computer Technology and Human Engineering / T. Tomizawa // Int. symp. Operational safety on Nuclear Power Plant. Marsilles, France, 2 - 6 May 1983. IAEA-SM-268/17. - 34 p.
30. *Sheperd G.* Neurobiology. Vol. 2. / G. Sheperd ; transl. from eng. - Moskwa : Mir, 1987. - 368 p. (Rus)
31. *Khyujbel D.* Eye, brain, eyes / D. Khyujbel ; transl. from eng. - Moskwa : Mir, 1990. - 239 p. (Rus)
32. *Sharaevsky I. G.* The possibilities of improving nuclear power plant computer control systems based on artificial intelligence techniques / I. G. Sharaevsky, E. N. Pis'menny, E. D. Domashev // Promyshlennaya teplotekhnika. - 2000. - Vol. 22. - № 1. - P. 70 - 77. (Rus)
33. *Evolution of approaches to determining the initial boiling point of the coolant in the heat-transfer surface HEEL* / N. M. Fialko, I. G. Sharaevsky, L. B. Zimin, N. O. Meranova // Problemy bezpeky atomnykh electrostantsiy i Chornobylya (Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chornobyl). - 2007. - Iss. 8. - P. 44 - 50. (Rus)

Надійшла 19.06.2017

Received 19.06.2017