



## О ПРИМЕНЕНИИ АЭ ТЕХНОЛОГИИ ПРИ НЕПРЕРЫВНОМ МОНИТОРИНГЕ ТРУБОПРОВОДОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ, РАБОТАЮЩИХ ПРИ ВЫСОКОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

**Б. Е. ПАТОН, Л. М. ЛОБАНОВ, А. Я. НЕДОСЕКА, С. А. НЕДОСЕКА, М. А. ЯРЕМЕНКО**

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

**Ю. И. ГЛАДЫШЕВ, В. М. БЕШУН, А. В. БЫЧКОВ, А. М. ГАЙДУКЕВИЧ**

СВП «Киевские ТЭЦ» ПАО «Киевэнерго». 01001, г. Киев, пл. И. Франко, 5. E-mail: kanf@kievenergo.com.ua

Рассмотрены вопросы применения на основе метода акустической эмиссии (АЭ) непрерывного мониторинга трубопроводов горячего промперегрева пара в процессе эксплуатации с прогнозированием разрушающей нагрузки. Проанализированы возможности внедрения АЭ метода для непрерывного мониторинга паропроводов энергоблока № 1 Киевской ТЭЦ-6. Исследованы акустические свойства материала паропроводов. Проведены предварительные АЭ высокотемпературные исследования материала паропроводов. Выполнены монтаж и испытания системы непрерывного АЭ мониторинга, запуск ее в режим опытной эксплуатации, коррекция настроек на основе полученных результатов измерений. Показано, что прогнозируемая системой непрерывного АЭ мониторинга разрушающая нагрузка определяется с достаточной для практики точностью. Представлена схема контроля и особенности практического применения системы. Библиогр. 21, табл. 1, рис. 6.

*Ключевые слова: акустическая эмиссия, непрерывный мониторинг, трубопровод, высокие температуры, прогноз, энергоблок, разрушающая нагрузка*

Трубопроводы, работающие в условиях высоких температур, являются промышленными объектами повышенной опасности. В процессе эксплуатации металл, из которого они изготовлены, накапливает повреждения, которые вызваны, в частности, нарушением эксплуатационных режимов, изменяющимися нагрузками, коррозионными и химическими процессами и рядом других факторов. Как правило, прямой зависимости между сроком эксплуатации трубопровода и степенью его поврежденности не существует, достаточно трудно также разделить поврежденность, вызванную действием каждого из определяющих факторов. В связи с этим наиболее перспективной представляется интегральная оценка поврежденности материала, без детализации факторов, вызвавших повреждения, главной задачей которой является предотвращение аварий. Независимо от причин возникновения аварий, их последствия могут быть весьма серьезными, поэтому для обеспечения надежной эксплуатации конструкций становится актуальным непрерывный контроль работоспособности и ее прогнозирование на период времени, необходимый для предотвращения опасности.

Это во многом объясняется тем, что расчеты несущей способности конструкций и конструктивных элементов, обеспечивающие достаточную эксплуатационную их надежность, затруднены по ряду причин, важнейшими из которых являются:

- недостаточная изученность, неполнота либо недостоверность исходных данных для выполнения расчетов;
- сложность, а чаще невозможность оперативного получения в процессе эксплуатации данных о текущем состоянии конструкций, особенно при сложном нагружении;
- опасность, а иногда и невозможность проведения экспериментов с целью определения несущей способности;
- недоступность в некоторых случаях объектов с целью проведения надежного неразрушающего контроля.

Вследствие этого в любой, даже прошедшей текущие испытания, конструкции существуют проблемные области, обоснование эксплуатационной надежности которых, особенно после длительной эксплуатационной наработки, является достаточно сложным, а иногда просто невозможным.

Эффективным средством для решения задачи обеспечения эксплуатационной надежности конструкций является создание информационно-измерительных систем, позволяющих оценить ее еще на стадии испытаний в условиях предстоящей эксплуатации, а также контролировать работоспособность этой конструкции непосредственно в процессе работы.

Современное развитие средств вычислительной техники, радиоэлектроники, прикладной ма-

© Б. Е. Патон, Л. М. Лобанов, А. Я. Недосека, С. А. Недосека, М. А. Яременко, Ю. И. Гладышев, В. М. Бешун, А. В. Бычков, А. М. Гайдукевич, 2014



тематики, техники испытаний, науки о прочности материалов и механики сплошной среды позволяют на достаточно высоком уровне решить задачу непрерывного контроля работоспособности конструкций в процессе эксплуатации.

Для работы информационно-измерительных систем необходимо регулярное получение оперативных данных, прежде всего о состоянии узлов конструкции и различного рода дефектов, которые накапливаются при эксплуатации. При наличии данных о конструкции и соответствующей обработки этой информации можно оценивать ее несущую способность оперативно, в реальном режиме времени. Это, в частности, дает возможность получить большие технические и экономические выгоды в тех областях техники, где из-за незнания истинных эксплуатационных нагрузок, истинного состояния материала конструкции, изменяющегося в процессе ее эксплуатации, могут возникнуть существенные ошибки при назначении рабочих параметров.

В настоящее время достаточно широко применяются автоматические системы управления на основе наблюдения за ходом технологических процессов, связанных с переработкой, получением или использованием в энергетических циклах тех или иных продуктов. В то же время контролю состояния конструкций, используемых для осуществления этих процессов, уделяется значительно меньше внимания. Как правило, оценка работоспособности конструкции проводится при регламентированной остановке процесса производства, с выполнением ряда технологических операций по обеспечению технической возможности контроля. Чаще всего провести 100%-ный контроль конструкции не удается из-за чрезвычайно большого объема и стоимости работ, связанных с его выполнением. Как правило, для контроля выбираются лишь отдельные участки, которые не всегда соответствуют наиболее поврежденным местам конструкции.

Для решения задачи контроля конструкций может быть с успехом использован метод АЭ, возникающей в материалах при критическом сочетании некоторых факторов воздействия, приводящим к появлению или развитию дефектов. Особенностью метода является возможность контролировать состояние материала на больших расстояниях от мест размещения датчиков, выполнять малым числом датчиков контроль крупных промышленных объектов, в том числе сложной геометрии и на участках, доступ к которым затруднен (подземных, покрытых изоляцией). Рассмотрим, как можно применить и какие получить результаты с использованием метода АЭ при непрерывном контроле высокотемпературных узлов тепловых станций.

Как известно, разрушение материалов энергетических установок, работающих в условиях ползучести при высоких температурах, характеризуется возникновением и развитием на границах зерен сначала микротрещин, затем постепенным превращением их в поры с последующим слиянием пор и образованием магистральной трещины, приводящей к разрушению материала [1–8].

На рис. 1 представлен график накопления пор в процессе эксплуатации стали 12Х1МФ, достаточно широко применяемой в системах трубопроводов тепловых станций.

Из графика видно, что чем больше приближается время эксплуатации к критическому ( $t_k$ ), тем большее количество образуется в металле пор, которые, соединяясь, в конечном счете образуют магистральную трещину. Изменение рабочей температуры в рассмотренных авторами пределах [2] незначительно влияет на механизм порообразования. В то же время величина относительного удлинения стали 12Х1МФ зависит от температуры и чем выше рабочая температура, тем выше относительное удлинение.

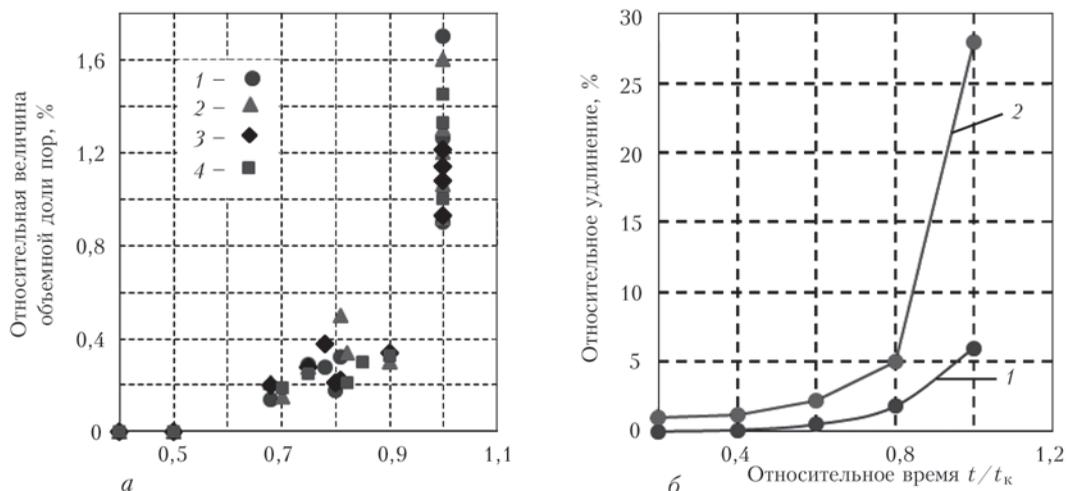


Рис. 1. Повреждаемость порами при ползучести (а: 1 – 550; 2 – 573; 3 – 600; 4 – 625 °С) и ползучесть стали 12Х1МФ (б: 1 – 550; 2 – 625 °С) [2]



Испытание материалов с применением метода АЭ показало, что образование и слияние пор в процессе разрушения материала при высоких температурах происходит также дискретно, как и при нормальных. На рис. 2 представлен график испытания стали 15X1M1Ф при температуре 560 °С. График демонстрирует явно выраженный дискретный характер развития процесса разрушения материала при этой температуре. Исследования разрушения материалов при растяжении в диапазоне температур 350...915 °С показали те же результаты.

Следовательно, методика АЭ контроля может быть использована и при оценке состояния материалов, работающих при высоких температурах [9–12]. На графике рис. 2: *P* – растягивающая нагрузка (синяя кривая); *A* – амплитуда АЭ сигналов, возникающих при разрушении материала (зеленая) и *Rt* – АЭ параметр «райс тайм», характеризующий «жесткость» процесса разрушения (розовая). Из графика видно, что с ростом нагрузки интенсивность разрушения материала и его жесткость изменяются в широких пределах. Это свидетельствует о явно выраженном дискретном характере разрушения и о влиянии на него постоянно изменяющегося упрочнения материала [13].

Изложенные выше рассуждения в полной мере относятся к материалам труб и, в частности, паропроводов, работающих в условиях высоких температур, например, на предприятиях теплоэнергетического комплекса. Проводимые в последнее время исследования показали возможность и эффективность применения метода АЭ в условиях высоких температур, в том числе промышленного применения на действующих трубопроводах тепловых станций.

Первичным в цепи этапов обеспечения надежности конструкций и оборудования в процессе эксплуатации должен служить их непрерывный мониторинг, получение непрерывного потока информации об их состоянии. С учетом позитивных результатов предварительно проведенных исследований и уже имеющегося опыта промышлен-

ного применения и существующей методики контроля [14–16], было принято решение о создании системы непрерывного АЭ мониторинга трубопровода горячего промперегрева пара киевской станции ТЭЦ-6.

Система была установлена на трубопроводе с диаметром труб 630 мм и толщиной стенки 25 мм. Материал труб – сталь 15X1M1Ф. Всего установлено 16 АЭ датчиков (на двух нитках трубопровода длиной по 120 м каждая).

Учитывая высокую температуру, при которой работает трубопровод, датчики устанавливали на волноводах длиной 500 мм (рис. 3). Расстояние между АЭ датчиками составляет 20 м. Кроме того, датчиками 15 и 16 выполняется контроль соединительного трубопровода диаметром 370 мм и с толщиной стенки 17 мм, выполненный из стали 12X1MФ.

В соответствии с техническими требованиями и представленными в техническом задании схемами выполнены монтаж системы непрерывного мониторинга, ее подключение к энергопитанию и компьютерной сети предприятия. Выполнены необходимые подготовительные мероприятия для запуска в опытную эксплуатацию. Выполнено подключение аппаратного и управляющего блоков в общую сеть контроля; система непрерывного мониторинга была запущена в режим опытной эксплуатации.

Основными задачами при прохождении системой непрерывного мониторинга периода опытной эксплуатации является установление оптимальных настроечных параметров, режимов эксплуатации системы, особенностей, связанных с работой системы на данном объекте, а также устранение выявленных неполадок. Контроль в период опытной эксплуатации является периодически-непрерывным. Это означает, что система периодически должна запускаться в режиме непрерывного мониторинга и периодически проводят разовые испытания объектов контроля.

Контроль, как непрерывный, так и периодический, выполнялся, в частности, на рабочих режи-

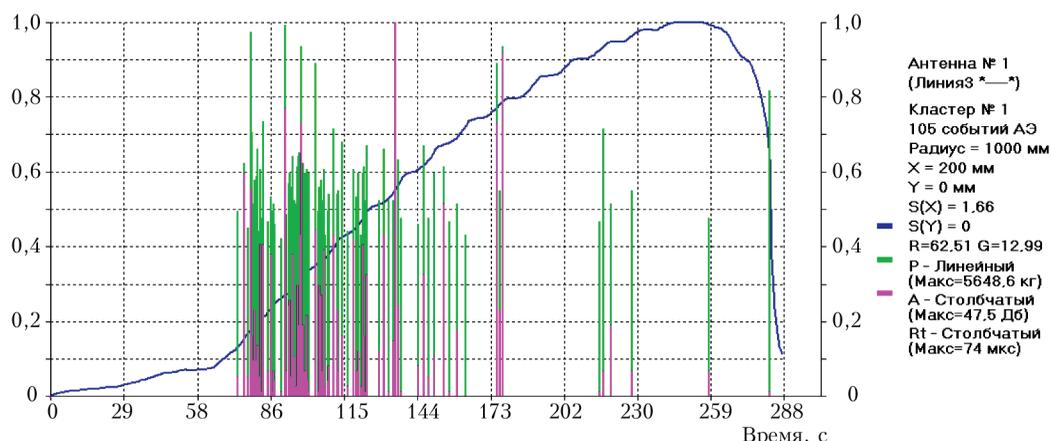


Рис. 2. Испытание на растяжение образца из стали 15X1M1Ф при температуре 560 °С



Рис. 3. Установка АЭ датчиков (а) на трубопроводе: датчик 1 в специальном коробе, установленном на приваренном к трубопроводу волноводе 2; соединительный кабель в гибкой изоляции 3 (б), в жестком коробе 4 (в)

мах трубопровода при давлении пара в трубе, равном 22 ат, температуре пара 542 °С. В процессе испытаний системой мониторинга автоматически определяли места повышенной опасности и выполняли прогноз разрушающей нагрузки [17, 18].

Работы по запуску смонтированной системы в эксплуатацию начали с прозвучивания подконтрольных участков трубопроводов импульсными сигналами от специального генератора для того, чтобы убедиться в необходимой чувствительности системы и наличии акустической связи между соседними датчиками АЭ. Предварительные тесты показали высокую чувствительность системы, что сделало возможным сформировать так называемые локационные антенны из групп датчиков, установленных на смежных участках трубопроводов, обеспечивающих нужный акустический контакт. Таким образом, сформированы три акустические антенны, в которые входят следующие датчики (номера каналов по схеме подключения к АЭ прибору): антенна 1 – номера с 1 по 7; 2 – с 8 по 14; 3 – 15 и 16.

Учитывая конфигурацию расположения датчиков, для всех трех антенн выбран линейный режим локации. Для поступающей информации, идентифицируемой как события АЭ, предусмотрен кластерный анализ, позволяющий объединять события по координатному и ряду других признаков. Применение такого подхода для реальных конструкций, особенно при сложной геометрии объектов и в условиях наличия помех, является очень эффективным [19, 20]. При наличии существенного разброса в определенных координатах событий, с высокой вероятностью принад-

лежащих к одному и тому же процессу в материале, объединение их в кластер позволяет наиболее точно указать место возникновения их источника. Особенно это важно для тех участков трубопровода, доступ к которым по техническим причинам невозможен. Необходимо учитывать, что оборудование промышленных предприятий является источником акустических и электромагнитных помех, которые могут влиять на качество передаваемой при мониторинге информации. Дополнительными источниками помех могут послужить проводимые рядом с объектами контроля ремонтные, монтажные, сварочные и другие виды работ. Для решения этих вопросов были созданы специальные программы, позволяющие максимально снизить влияние шумового фона на работу основного алгоритма, используемого при контроле.

Испытания начаты в холодный сезон, при рабочих параметрах работы трубопроводов и продолжены после их разгрузки. Уже предварительные данные показали высокую информативность метода, но и определенные проблемы в настройке системы в условиях высоких технологических шумов.

Сначала происходило тестирование и установка аппаратных режимов, т. е. таких, которые непосредственно влияют на получение информации и не могут быть изменены во время компьютерной повторной обработки полученных данных. Прежде всего были протестированы режимы работы с различными коэффициентами усиления и установлено, что оптимальные данные АЭ получены при работе в логарифмическом режиме усилителей, в котором они предварительно и настроены работать. Следующие тесты касались уровня и типа порогов амплитудной дискриминации. Учитывая данные первичных испытаний и высокий уровень шумов самого объекта контроля, установлено, что оптимальными настройками порогов являются плавающие, т. е. порог автоматически меняется вслед за общим уровнем шума, зафиксированным конкретным датчиком. Оптимальный плавающий порог должен незначительно превышать текущий уровень шума на датчике. Коррекция величины порога происходит каждые 30 с. При таких настройках была обеспечена нужная чувствительность измерений, но поток информации с учетом значительных шумов поступал слишком высокий, поэтому возник вопрос дополнительной фильтрации данных, который был решен на основе дополнительных тестов на объекте и анализа данных испытаний образцов из материалов – аналогов в условиях высоких температур [3–5]. В частно-



Рис. 4. АЭ активность трубопровода в рабочем состоянии через 1 ч от начала контроля при первоначальных настройках системы (а), без использования фильтров (б)

сти, рассмотрена эффективность фильтрации по таким параметрам сигналов АЭ как амплитуда и время нарастания (райс тайм) [19].

Предварительными результатами по использованию фильтрации показано следующее:

- применение фильтрации по амплитуде приводит к снижению количества событий АЭ, которые попадают в сложившиеся кластеры. Соответственно уровни предупреждений снижаются;
- при применении фильтрации по амплитуде отбраковывается часть событий АЭ, соответствующих истинным источникам АЭ в материале трубопроводов;
- при подъеме нижней границы фильтра по амплитуде выше 60...65 дБ события АЭ отбраковываются почти полностью, при установке ее ниже 55 дБ фильтр не является эффективным;

– в настройках мониторинга эффективно может быть использован фильтр по параметру «райс тайм»;

– фильтрация по данному параметру приводит к снижению уровня предупреждений, при этом активные источники АЭ формируют кластеры и могут быть четко выделены из общего шумового фона;

– аналогичным образом были проанализированы возможность и эффективность фильтрации по длительности, частоте, скорости сигналов АЭ и выбраны оптимальные полосы фильтрации, обеспечивающие достаточность информации для поиска опасных мест и генерирования соответствующих предупреждений. Поскольку после перехода к штатной эксплуатации предполагается использовать прогнозирование разрушающей нагрузки по

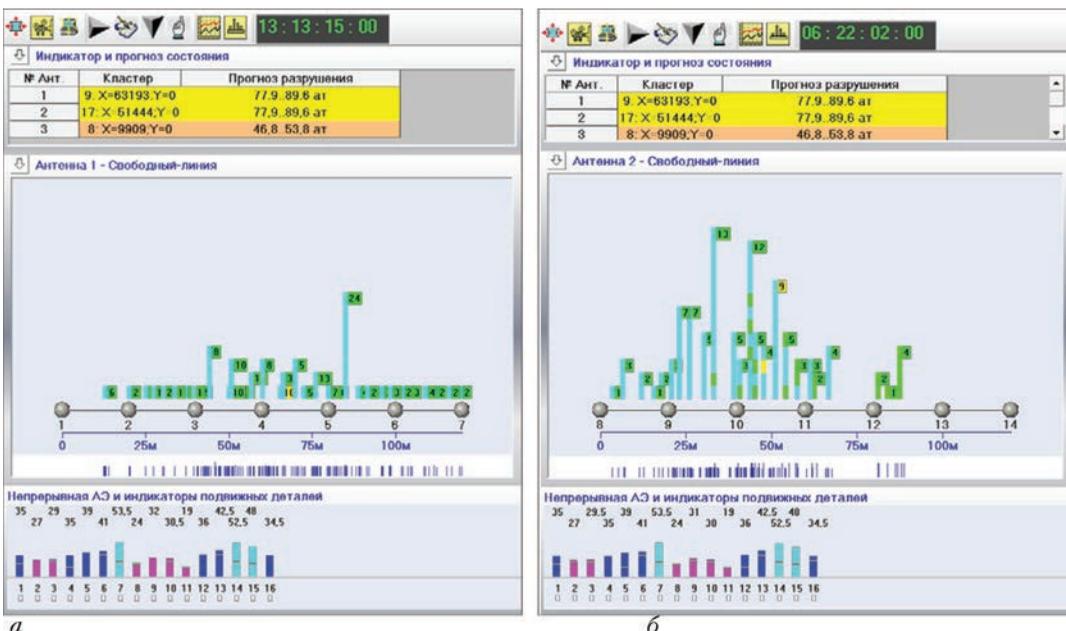


Рис. 5. Состояние АЭ активности двух ниток трубопровода в рабочем состоянии через 13 ч 13 мин (антенна 1) (а) и 6 ч 22 мин (антенна 2) (б) от начала контроля (сверху в таблице представлены величины прогнозируемой предельной нагрузки)

Действия персонала при различных показаниях индикатора опасности

Уровень предупреждения	Цвет индикатора	Действия персонала
1	Зеленый	Штатный режим. Продолжить эксплуатацию.
2	Желтый	Внимание. При появлении прогнозируемого разрушающего уровня давления и превышении его над рабочим более чем в два раза – продолжить эксплуатацию.
3	Оранжевый	Оценить прогнозируемый разрушающий уровень давления по показаниям индикатора. При превышении прогнозируемого уровня над рабочим менее чем в два раза повысить внимание. При уменьшении прогнозируемого давления до 1,3 от рабочего – остановить эксплуатацию. Провести дополнительную проверку проблемного узла.
4	Красный пульсирующий	Остановить эксплуатацию. После появления прерывистого звукового сигнала немедленно снизить нагрузку.

*Примечание.* Данные таблицы получены для аппаратуры с техническими характеристиками ЕМА 3.9

данным АЭ, на полученных данных выполнены проверки задействованных в системе алгоритмов прогнозирования. При этом прогноз и предупреждение об опасности происходит согласно приведенным таблицам. Расчет прогнозной разрушающей нагрузки выполняется автоматически.

Действия персонала в соответствии с показателями индикатора опасности во время непрерывного мониторинга регламентируются таблицей.

Тестовые испытания смонтированной системы проводили в стандартном режиме непрерывного мониторинга и в виде разовых испытаний. Стандартный режим предусматривает автоматическое сохранение файлов продолжительностью 30 мин с последующим началом записи нового файла.

Такой режим, с одной стороны, позволяет легко находить на жестком диске управляющего компьютера данные за нужное время и гарантировать надежность хранения информации, меньше нагружать процессор компьютера и оперативную память. С другой стороны, система является достаточно надежной для получения и хранения в едином файле значительных объемов информации. Одним из показателей надежности системы является обеспеченность запаса мощности компьютера для обработки и хранения больших, чем при стандартных испытаниях, объемов данных. Поэтому было проведено несколько тестов, самый длительный из которых предусматривал непрерывный анализ информации и запись ее в единый файл в течение суток, и еще нескольких файлов продолжительностью более 10 ч.

На рис. 4 представлены некоторые элементы окна программы, выполняющей мониторинг, после 1 ч контроля трубопровода в рабочем состоянии при первоначальных, стандартных настройках системы. Представленные на схеме столбики отражают места концентрации АЭ событий в каждом контролируемом кластере. Цифры на флажках показывают количество АЭ событий в кластере, цвет флажков указывает на степень опасности протекающего в кластере процесса разрушения.

Над схемой кластеров в окне прогнозирования в специальной таблице для трех антенн, контролирующей всю систему трубопроводов, представлена цветом опасность ситуации на определенном участке трубопровода в данный момент времени. Показаны координаты наиболее опасных мест на всем трубопроводе общей длиной 240 м (по антеннам 1, 2) и прогнозируемые разрушающие давления в этих местах трубопровода. Антенна 3 контролирует участок трубопровода из стали 12Х1МФ длиной 20 м диаметром 377 мм с толщиной стенки 17 мм.

В нижней части экранов приведены мгновенные значения непрерывной эмиссии, регистрируемой каждым контролирующим АЭ датчиком. Интенсивность эмиссии ранжирована высотой столбца и цветом.

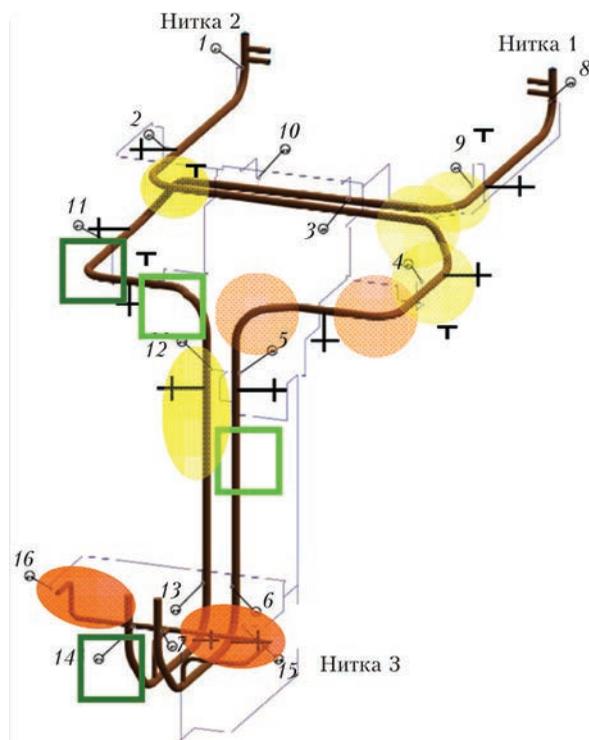


Рис. 6. Схема трубопровода ГПП с местами повышенной АЭ активности (цифрами указаны номера АЭ датчиков, крестиками – технологические отметки)



Отметим, что данные на рис. 4 были получены до оптимизации настроек, в связи с чем представленная информация, включая показания индикаторов и результаты прогноза разрушения, рассматривалась как первоначальный этап для дальнейшей калибровки системы. Полученные результаты важны самим наличием АЭ данных и принципиальной возможностью обеспечить индикацию опасности, прогноз разрушения, чтобы затем на этой основе выполнить необходимую коррекцию настроек системы таким образом, чтобы результаты соответствовали физическому состоянию контролируемого материала.

На рис. 5 схематически приведена часть трубопровода, контролируемая антенной 1 и 2 (нитка № 1 и 2 длиной по 120 м). Показаны датчики, начиная от 1 до 14. Ниже показана условная шкала расстояний от 0 до 100 м на каждом участке. Представленные на рис. 5 данные получены после детального исследования влияния помех и технологических шумов на результаты мониторинга. На основании данных мониторинга и высокотемпературных испытаний образцов были получены данные о наиболее эффективных способах фильтрации по параметрам получаемых событий АЭ, затем к уже полученным данным применены соответствующие фильтры. Проведена также необходимая коррекция настроек прогноза разрушения.

Представленные на рис. 5 данные являются весьма показательными, поскольку запись АЭ с соответствующим анализом и прогнозом разрушения велась достаточно длительное время, что послужило дополнительной проверкой работоспособности системы в целом при достаточно больших потоках вводной информации, а также правильности выбранных настроек.

Как видим, АЭ активность материала при его деформировании имеет различные значения в разных точках трубопроводов. Система мониторинга выбирает наиболее слабые места и автоматически, в реальном времени рассчитывает прогнозную разрушающую нагрузку.

Наибольшая АЭ активность соответствует участку между 8 и 12 датчиками. Первая и вторая антенны показывают координаты 63 и 51 м с наибольшей АЭ активностью. В то же время прогнозируемые разрушающие нагрузки в несколько раз превышают рабочие нагрузки, что свидетельствует о возможности дальнейшей эксплуатации трубопровода этих ниток (цвет желтый). Антенна 3 контролирует участок трубопровода, находящийся в худших условиях по сравнению с 1 и 2 участками. В этом случае на участке трубы на расстоянии примерно 10 м от ее начала прогнозируемая разрушающая нагрузка примерно в два раза превышает рабочую, в то время как участки 1 и 2 показывают, что разрушающая нагрузка

ка превышает рабочую примерно в четыре раза (цвет зоны 3 оранжевый).

Для повышения надежности в принятии решения о необходимости остановки и вывода из эксплуатации конструкций по данным контроля установлены коэффициенты запаса по прогнозируемой разрушающей нагрузке. При этом чем большая разница между прогнозируемой и рабочей нагрузкой, тем меньший коэффициент запаса устанавливает система. С уменьшением отношения  $P_{\text{раб.}}/P_{\text{прог.}}$  коэффициент запаса автоматически увеличивается.

На рис. 6 представлена схема контролируемых ниток трубопровода с отмеченными местами повышенной АЭ активности. Зелеными квадратами указаны участки, в которых ранее предприятие проводило плановый неразрушающий контроль и дефекты обнаружены не были (темно-зеленый – 2013 г., светло-зеленый – 2009 г.). Желтыми и оранжевыми эллипсами разной интенсивности показаны участки повышенной акустической активности, для которых системой сгенерированы предупреждения 1 и 2 уровня в соответствии с таблицей.

Отметим, что в числе обнаруженных потенциально опасных участков есть такие, доступ к которым затруднен и проведение контроля другими методами требует серьезных затрат времени. Это еще раз подтверждает правильность выбора метода АЭ для непрерывного мониторинга трубопроводов промперегрева.

Дополнительная эффективность работы системы мониторинга достигается также наличием удаленного доступа посредством сети Интернет. Имеется накопленный положительный опыт [16] авторского надзора специалистами ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ по результатам непрерывного АЭ мониторинга, создания интегрирующих информационных систем, объединяющих результаты мониторинга разных объектов на одном экране и проводящих их совместный анализ.

Сегодня имеются все необходимые аппаратные, программные и организационные средства для оснащения оборудования энергетической отрасли системами непрерывного АЭ мониторинга, а их использование является [15] источником обеспечения безопасной эксплуатации и повышения рентабельности работы предприятий [21].

### Выводы

Разработана и внедрена в опытную эксплуатацию система непрерывного АЭ мониторинга паропроводов горячего промперегрева пара энергоблока № 1 киевской ТЭЦ-6. Исследованы акустические свойства материала паропроводов. Проведены предварительные АЭ высокотемпературные исследования материала паропроводов.



Разработанная методика позволяет на основе данных АЭ в реальных условиях эксплуатации конструкций в любой момент времени и независимо от объема наработки и колебаний температуры определять разрушающую нагрузку материала конструкции. Прогнозируемая системой непрерывного АЭ мониторинга разрушающая нагрузка определяется с достаточной для практики точностью.

С целью обеспечения запаса по времени при принятии решения о состоянии контролируемого объекта, для прогнозируемой разрушающей нагрузки установлены коэффициенты запаса, определяемые системой мониторинга автоматически в зависимости от степени опасности развивающихся в материале деструктивных процессов.

Представлены схема контроля и особенности практического применения системы мониторинга. Примененная методика и технология позволяют определять координаты участков объекта контроля с минимальным значением разрушающей нагрузки. Удаленный доступ позволяет посредством сети Интернет выполнять авторский надзор за работой системы.

1. Березина Т. Г. Исследование закономерностей развития разрушения при ползучести теплоустойчивых сталей // Пробл. прочности. – 1985. – № 8. – С. 48–52.
2. Березина Т. Г., Бугай Н. В., Трунин И. И. Диагностирование и прогнозирование долговечности металла теплоэнергетических установок. – Киев: Техніка, 1991. – 120 с.
3. Исследование АЭ характеристик стали 12Х18Н10Т при температуре 560 °С. Сообщение 1. Методика и некоторые результаты / А. Я. Недосека, С. А. Недосека, А. А. Грузд и др. // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 2011. – № 1. – С. 13–19.
4. Исследование АЭ характеристик материалов при высоких температурах. Сообщение 1. Методика / Л. М. Лобанов, А. Я. Недосека, С. А. Недосека и др. // Там же. – 2009. – № 1. – С. 5–10.
5. Исследование АЭ характеристик материалов при высоких температурах. Сообщение 2 / Л. М. Лобанов, А. Я. Недосека, С. А. Недосека и др. // Там же. – 2009. – № 4. – С. 5–13.
6. Куманин В. И., Ковалева Л. А., Алексеев С. В. Долговечность металла в условиях ползучести. – М.: Металлургия, 1988. – 202 с.
7. Минц И. И., Березина Т. Г., Ходыкина Л. Е. Исследование тонкой структуры и процесса образования пор в стали 12Х1МФ при ползучести // Физ. металлов и металлоредение. – 1974. – 37, вып. 4. – С. 823–876.
8. Тайра С., Отани Р. Теория высокотемпературной прочности материалов. – М.: Металлургия, 1986. – 279 с.
9. Модель накопления повреждений в металлических материалах при статическом растяжении / А. А. Лебедев, Н. Г. Чаусов, С. А. Недосека, И. О. Богинич // Пробл. прочности. – 1995. – № 7. – С. 31–40.
10. Недосека С. А. Объектный подход к решению задач механики сплошной среды и прогнозированию состояния материалов // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 1998. – № 1. – С. 13–21.
11. Недосека С. А. Прогноз разрушения по данным акустической эмиссии // Там же. – 2007. – № 2. – С. 3–9.
12. Недосека С. А., Недосека А. Я. Комплексная оценка поврежденности и остаточного ресурса металлов с эксплуатационной наработкой // Там же. – 2010. – № 1. – С. 9–16.
13. Мортон К. Смит. Основы физики металлов. – М.: Металлургиздат, 1962. – 456 с.
14. Акустическая эмиссия и ресурс конструкций: Теория, методы, технологии, средства, применение / Б. Е. Патон, Л. М. Лобанов, А. Я. Недосека и др. – Киев: Индпром, 2012. – 312 с.
15. Недосека А. Я., Недосека С. А., Яременко М. А. Непрерывный мониторинг магистральных газопроводов и газокompрессорных станций методом акустической эмиссии // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 2011. – № 4. – С. 3–13.
16. Опыт ИЭС им. Е. О. Патона в области акустико-эмиссионного контроля / Б. Е. Патон, Л. М. Лобанов, А. Я. Недосека и др. // Там же. – 2012. – № 1. – С. 7–22.
17. Недосека А. Я. Основы расчета и диагностики сварных конструкций / Под ред. Б. Е. Патона. – Киев: Индпром, 2008. – 812 с.
18. Структура, повреждаемость и свойства гибов паропроводов после длительной эксплуатации / П. И. Минц, Т. Г. Березина, Л. Е. Ходыкина и др. // Теплоэнергетика. – 1981. – № 10. – С. 49–51.
19. Недосека С. А., Недосека А. Я., Овсиенко М. А. Влияние методов обработки акустико-эмиссионной информации на формирование АЭ событий и определение их координат // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 2011. – № 2. – С. 5–14.
20. Недосека С. А., Овсиенко М. А. Особенности обработки данных акустической эмиссии для сложных и множественных локационных антенн // Там же. – 2012. – № 2. – С. 7–12.
21. ТУ 14-3-460: 2009/ТУ 27.2-05757883-207:2009. Трубы стальные бесшовные для паровых котлов и трубопроводов.

The paper deals with the issues of application on the basis of acoustic emission method (AE) of continuous monitoring of hot reheat steam piping during operation with breaking load prediction. Capabilities of introduction of AE method for continuous monitoring of steam piping of a power unit of Kiev TPP have been analyzed. Acoustic properties of steam piping material have been studied. Preliminary high-temperature AE studies of steam piping material have been conducted. Mounting and testing of continuous AE monitoring system, its commissioning in test operation mode, and correction of settings based on obtained measurement results have been performed. It is shown that breaking load predicted by continuous AE monitoring system is determined with accuracy sufficient for practical purposes. Schematic of monitoring and features of practical application of the system are presented. 21 References, 1 Table, 6 Figures.

*Keywords:* acoustic emission, continuous piping monitoring, breaking load prediction

Поступила в редакцию  
04.06.2014