

# РАННЕЕ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ ПО МОНИТОРИНГУ МИКРОЧАСТИЦ

П.А. Александров, В.И. Калечиц, Р.С. Лысов, О.Ю. Маслаков,  
Е.С. Хозяшева, А.П. Чечуев, П.В. Чечуев, М.Н. Шахов



**АЛЕКСАНДРОВ**  
Петр Анатольевич

Доктор физико-математических наук. Директор Института информационных технологий (ИИТ) РНЦ «Курчатовский институт». Автор более 70 научных трудов, в том числе 2 монографий, ряда изобретений. Неоднократный лауреат премии имени И. В. Курчатова. Специалист в области физики поверхности, нанотехнологии.

## **КАЛЕЧИЦ Вадим Игоревич**

Кандидат физико-математических наук. Начальник лаборатории оптических и аэрозольных приборов ИИТ РНЦ «Курчатовский институт». Автор 49 научных работ и изобретений. Специалист в области лазерной диагностики дисперсных сред, технологии чистых производственных помещений.

## **ЛЫСОВ Роман Сергеевич**

Аспирант лаборатории оптических аэрозольных приборов ИИТ РНЦ «Курчатовский институт». Специализируется в области математического и программно-аналитического обеспечения вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей.

## **МАСЛАКОВ Олег Юрьевич**

Ведущий электроник лаборатории оптических аэрозольных приборов ИИТ РНЦ «Курчатовский институт». Специализируется в области приборостроения и систем мониторинга параметров дисперсных сред. Автор более 20 научных работ.

## **ХОЗЯШЕВА Екатерина Сергеевна**

Научный сотрудник лаборатории оптических аэрозольных приборов ИИТ РНЦ «Курчатовский институт», аспирант. Лауреат премии имени И.В. Курчатова. Специализируется в области физики и диагностики аэродисперсных сред. Автор нескольких научных работ.

## **Концепция раннего обнаружения аварийных и предаварийных состояний по мониторингу аэрозолей**

С ростом сложности используемых в промышленности технических и технологических систем неминуемо возрастает вероятность отказов и поломок оборудования вплоть до возникновения аварийных ситуаций. Соответственно все более актуальной становится задача разработки средств контроля и диагностики аварийных состояний. В настоящее время для обнаружения аварийных ситуаций применяются системы, действие которых основано на регистрации последствий аварии. Как правило, в состав такой системы входит датчик, фиксирующий отклонение от нормально-

## **ЧЕЧУЕВ Артемий Павлович**

Аспирант лаборатории оптических аэрозольных приборов ИИТ РНЦ «Курчатовский институт». Специализируется в области микроэлектроники и программного обеспечения систем мониторинга и анализа данных.

## **ЧЕЧУЕВ Павел Валентинович**

Главный специалист лаборатории оптических аэрозольных приборов ИИТ РНЦ «Курчатовский институт». Специалист в области физики аэродисперсных сред. Автор более 25 научных трудов.

## **ШАХОВ Михаил Николаевич**

Младший научный сотрудник лаборатории оптических аэрозольных приборов ИИТ РНЦ «Курчатовский институт». Лауреат премии имени И.В. Курчатова. Специализируется в области физики поверхности. Автор нескольких научных работ.

го хода процесса (отсутствие давления, снижение или повышение температуры, прекращение подачи электропитания или отклонение в параметрах электрических цепей, падение уровня жидкости и т.п.). При этом последствия развития аварий будут тем тяжелее, чем на более поздней стадии она обнаружена. В этом смысле существенное преимущество имеют системы контроля, способные зафиксировать нештатную работу оборудования на самой ранней, предаварийной стадии и тем самым предотвратить возникновение аварийной ситуации.

В работах, выполненных в Институте информационных технологий Российского научного центра «Курчатовский институт», предложена принципиально новая разработка – система раннего обнаружения аварийных и предаварийных состояний (**система РОАП**), которая базируется на мониторинге микрочастиц в технологических средах и в воздухе производственных помещений и использует принцип регистрации отдельных частиц в широком диапазоне размеров [1, 2].

В данном случае микрочастицы – это детектируемые оптическими способами объекты размером 0,1-100 мкм в прозрачном веществе (воздух, вода, масло и пр.). Принцип регистрации **отдельных** частиц в указанном диапазоне размеров представляет уникальные возможности обнаружения аварийных ситуаций различной природы. Эта возможность связана с тем, что практически любое значительное изменение режима работы установок или оборудования, нарушение хода технологического процесса и другие аварийные ситуации сопровождаются резкими колебаниями (как правило, в сторону усиления) процессов генерации микрочастиц. Так, например, значительное количество аэрозольных (т.е. взвешенных в воздухе) частиц выделяется при горении любых материалов, искрении электроконтактов, нагревании и термической деструкции веществ, механической эрозии материалов, испарении и кипении жидкостей, туманообразовании и т.д.

Проведенные эксперименты позволяют с уверенностью констатировать, что изменения счетной концентрации частиц (количества аэрозольных частиц в единице объема воздуха) в замкнутом пространстве сопровождают все перечисленные явления, причем регистрация указанных изменений происходит на очень ранней стадии, часто до появления каких-либо визуальных признаков процесса, что даёт возможность не только фиксировать факт возникновения аварийной ситуации, но и предотвратить ее.

Аналогичные явления наблюдаются и в других технологических средах. Износ пар трения вызывает рост концентрации механических примесей в масле редукторов и двигателей, локальные пробой и разрушение изоляции приводят к увеличению числа микрочастиц в масляных трансформаторах, загрязнение гидравлических жидкостей указывает на развивающуюся неисправность, которая может привести к выходу из строя силовых механизмов.

Привлекает внимание также и то, что поскольку приборы контроля микрозагрязнений измеряют не просто счетную концентрацию, но и дисперсный состав частиц (распределение частиц по размерам), во многих случаях удаётся сопоставить характерные изменения функции распределения микрочастиц по размерам с характером развивающейся неисправности. Таким образом, появляется возможность инструментальными методами обнаружить возникновение нежелательных процессов и даже диагностировать их в ходе работы практически любого оборудования.

Кроме обеспечения безопасности работы оборудования, с качеством диагностики тесно связаны такие важнейшие показатели, как коэффициент использования установленной мощности (КИУМ) и возможность продления срока эксплуатации [1]. Естественными требованиями к системам диагностики являются высокая чувствительность и избирательность, позволяющие зарегистрировать самое начало развития аварийной ситуации, чтобы иметь возможность предотвратить аварию. Кроме того, диагностика должна по возможности не нарушать

нормальную работу оборудования и, конечно, быть достаточно дешевой.

Система РОАП по мониторингу микрочастиц в технологических средах – воздухе, масле и др. в значительной мере удовлетворяет указанным требованиям. Так, ее чувствительность в значительной степени определяется фоновым содержанием частиц в среде. Например, для случая аэрозолей, т.е. микрочастиц в воздухе, типичная счетная концентрация в помещениях атомной электростанции (АЭС) для частиц диаметром более 0,3 мкм составляет  $2 \times 10^4$  част./л воздуха [3]. Приняв за критерий чувствительности возможность уверенного измерения удвоения фоновой концентрации, легко определить, что при удельном весе аэрозолей 1 г/см<sup>3</sup> и диаметре 0,5 мкм, общий вес  $2 \times 10^4$  частиц аэрозолей будет составлять  $2 \times 10^{-7}\%$  от веса 1 л воздуха. Очевидно, что полученное значение чувствительности увеличивается с увеличением чистоты воздуха в помещениях. Столь высокая чувствительность метода позволяет использовать систему РОАП в больших производственных помещениях (характерных, например, для объектов энергетики), где велико разбавление воздуха и происходит существенное снижение концентрации частиц.

Следует заметить, что существующие системы противопожарной безопасности основаны на регистрации измерений массовой концентрации образующихся в помещении аэрозолей при задымлении, либо изменений температуры. Фактически они лишь регистрируют последствия уже возникшей критической ситуации – возгорания. Так, датчики, реагирующие на повышение температуры, срабатывают лишь после того, как будет нагрет воздух в непосредственной близости от датчика (за счет естественной конвекции воздуха или вентиляционных воздушных потоков). Этот процесс, как правило, занимает слишком большое время, и реакция на возгорание может оказаться очень запоздалой.

В противопожарных системах, использующих датчики массовых концентраций, для срабатывания системы требуется превышение (как

правило, на порядок) санитарных норм на содержание взвешенных в воздухе частиц (нормы для частиц различного химического состава колеблются в пределах 1-75 мг/м<sup>3</sup>), что соответствует счётной концентрации частиц в пределах  $10^9$ - $10^{12}$  част./м<sup>3</sup>. Учитывая, что в обычном атмосферном воздухе содержание взвешенной в воздухе дисперсной фазы составляет 0,1-0,5 мг/м<sup>3</sup> (т.е. счетная концентрация частиц равна  $10^8$ - $10^9$  част./м<sup>3</sup>), нетрудно сделать вывод, что для срабатывания системы необходимо повышение счетной концентрации частиц в воздухе на два-четыре порядка. Таким образом, время реакции такой системы на возгорание весьма значительно. Естественно, что и реакция на возгорание (т.е. необходимые оперативные действия) может оказаться очень запоздалой.

Таким образом, основным преимуществом системы типа РОАП является возможность обнаружения предаварийной ситуации на очень ранней стадии, что принципиально невозможно в аналогах.

### Структурная схема системы РОАП

Система раннего обнаружения и диагностики аварийных и предаварийных состояний состоит из измерительного комплекса, включающего набор необходимых датчиков и обеспечивающего получение данных о параметрах объекта, и программный комплекс обработки текущей информации и анализа состояния объекта. Основные функциональные модули и узлы системы представлены на рис. 1 и в табл. 1.

Основу аппаратной реализации системы РОАП представляют датчики микрочастиц в контролируемых средах. Можно применять приборы такого типа, выпускаемые за рубежом, но они предназначены для контроля чистых производственных помещений и могут использоваться для мониторинга предаварийных ситуаций только после адаптации. Счетчики и датчики микрочастиц, специально спроектированные для работы в системах типа РОАП, разработаны в РНЦ «Курчатовский институт».

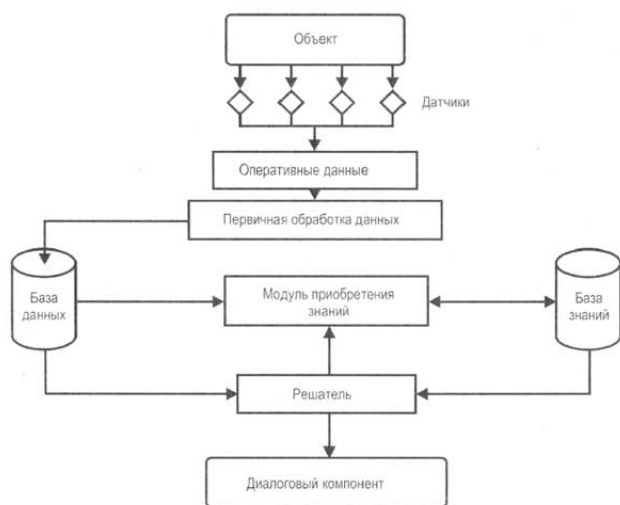


Рис. 1. Структура системы раннего обнаружения и диагностики аварийных и предаварийных состояний

Лазерный счетчик (датчик) аэрозолей ЛСА-03 (рис. 2) может использоваться как датчик аэрозолей в составе компьютерной системы РОАП, а также как автономный переносной прибор.

В последнем случае он может работать как в режиме счетчика частиц (подсчитывается общее число импульсов, амплитуда которых превышает заданную величину), так и спектро-

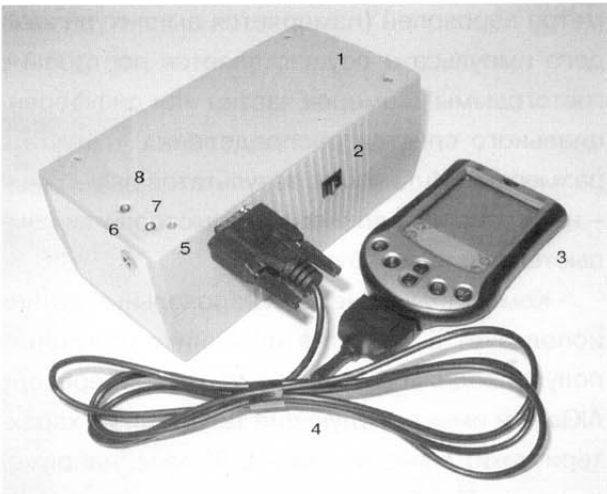


Рис. 2. Датчик ЛСА-03 (с подключенным для автономного использования наладонным компьютером Palm):  
1 – корпус датчика; 2 – выключатель питания датчика;  
3 – наладонный компьютер Palm, поддерживающий протокол RS-232; 4 – стандартный COM-COM кабель для подключения датчика к COM разъему персонального или наладонного компьютера; 5 – стандартный 9-контактный цифровой разъем протокола RS-232 (COM), с подключенным к нему COM-кабелем; 6 – стандартный разъем для подключения внешнего источника питания постоянного напряжения от 6 до 9 В; 7 – зеленый светодиод индикации включения датчика; 8 – красный светодиод индикации разряда аккумулятора

Таблица 1

Назначение модулей

| Модуль                     | Описание                                                                                                                                                                                                                                        |
|----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Объект                     | Наблюдаемый объект                                                                                                                                                                                                                              |
| Датчики                    | Приборы, с помощью которых производится мониторинг различных параметров диагностируемого объекта                                                                                                                                                |
| Оперативные данные         | Модуль собирает данные со всех датчиков, обеспечивает их кратковременное хранение, диспетчеризацию и корректную передачу в компонент первичной обработки                                                                                        |
| Первичная обработка данных | Основным назначением модуля является подготовка данных к сохранению в базе. Хранение данных в том виде, в котором они поступают с датчиков не всегда целесообразно, так как дальнейший анализ такой информации затруднителен                    |
| База данных                | Модуль предназначен для хранения обработанных исходных данных, а также промежуточных данных решаемой задачи                                                                                                                                     |
| База знаний                | База знаний предназначена для хранения выявленных закономерностей работы системы, правил оценки состояния, диагностирования и выявления неисправностей, а также возможные рекомендации оператору для предотвращения аварийных ситуаций          |
| Решатель                   | Компонент использует исходные данные из базы данных и знания из базы знаний, формирует такую последовательность правил, которые в сочетании с исходными данными приводят к решению задачи                                                       |
| Модуль приобретения знаний | Компонент приобретения знаний автоматизирует процесс наполнения экспертной системы знаниями. Этот процесс осуществляется с помощью пользователя-эксперта                                                                                        |
| Диалоговый компонент       | Компонент обеспечивает диалоговый интерфейс с пользователями системы, дает рекомендации оператору, объясняет, как экспертная система получила то или иное решение задачи (или почему она его получила) и какие знания она при этом использовала |

метра аэрозолей (измеряется амплитуда каждого импульса и осуществляется построение гистограммы размеров частиц или дифференциального спектра распределения частиц по размерам). Индикация результатов измерений – на экране наладонного компьютера или компьютера типа ноутбук.

Компактный лазерный аэрозольный датчик использует в качестве источника излучения полупроводниковый лазер на гетеропереходе AlGaAs и имеет следующие технические характеристики: длина волны – 0,82 мкм; напряжение питания – 5 В; высокая выходная мощность излучения – до 100 мВт; внутренний опорный фотодиод; внутренняя цилиндрическая микролинза. Малошумящий твердотельный фотоприемник со встроенным усилителем сопряжен с лазерным модулем, т.е. имеет максимальную чувствительность также на длине волны излучения 0,82 мкм. Прокачка анализируемой среды обеспечивается встроенным в датчик насосом. Компоненты датчика помещены в стандартный пластиковый корпус с габаритными размерами 200 мм × 100 мм × 80 мм.

В сетевом варианте датчики типа ЛСА-03 подключаются последовательно друг к другу и к стационарному компьютеру, который осуществляет опрос датчиков и обработку поступающей с них информации.

Датчики для измерения частиц в более плотных средах – воде, масле, других технологических жидкостях – построены на том же принципе, но имеют несколько другую конфигурацию оптической части.

Чтобы диагностировать оборудование на основе показаний датчиков для предотвращения аварийных ситуаций на ранних стадиях, была создана аналитическая модель, основными показателями которой является считываемая с датчиков информация.

Пусть имеется некий объект  $S$ , мониторинг состояния которого осуществляется с помощью набора датчиков  $\{D_1, D_2, \dots, D_L\}$ . При этом контролируемые значения величин измеряют дискретно во времени с интервалом  $\Delta t$ . Каждый из датчиков  $D_i$  относится к определенному классу

$C_j$  в зависимости от измеряемого параметра (температура, относительная влажность, концентрация и размер аэрозолей и др.):

$$\forall D_i \Rightarrow D_i \in C_j \wedge D_i \notin C_{k \neq j}; i = 1..L; j, k = 1..M.$$

Показания каждого датчика  $D_i$  в момент времени  $t_j$  задается вектором  $X_{ij} = (x_1, x_2, \dots, x_p)^T$ , размерность которого определяется классом датчика:

$$D_i(t_j) = X_{ij}.$$

Данная математическая модель представляет собой экспертную систему, позволяющую на основе этих данных определять, в каком состоянии находится объект и есть ли предпосылки возможных сбоев и неполадок в работе оборудования.

Определяющим классом датчиков, на основе которых будет проводиться диагностика объекта, является набор датчиков, измеряющих счетную концентрацию и дисперсный состав аэрозольной составляющей. Информация предоставляется в виде гистограмм распределения частиц по размерам, т.е. для каждого диапазона размеров  $r_i$  прибор показывает количество частиц  $N_i$ .

Результатом решения этой задачи является совокупность показаний приборов, математическая модель и программное обеспечение, которое позволит проводить диагностику наблюдаемой системы на основе показаний датчиков.

Одним из первых шагов, который необходимо сделать при построении описанной экспертной системы, является выбор методов первичной обработки и преобразования поступающей информации для хранения в базе данных. Приборы, измеряющие дисперсный состав аэрозолей, предоставляют данные в виде гистограмм распределения частиц по размерам, т.е. в каждый момент времени  $t_i$  прибор регистрирует количество частиц, размеры которых попали в определенные диапазоны:

$$N(r_i) = N_i, i = 1, \dots, M,$$

где  $M$  – количество каналов счета;  $r_i$  – размер частиц в  $i$ -м канале;  $N_i$  – измеренное количество частиц в  $i$ -м канале прибора.

Хранить информацию в виде таблиц неудобно и существенно затрудняет дальнейший анализ. Для организации эффективного накопления данных необходимо выделить ключевые составляющие входящего потока информации, в качестве которых могут быть использованы, например, следующие значения:

$$N_{\min} = \min(N_i); N_{\max} = \max(N_i);$$

$$i = 1 \dots n \quad i = 1 \dots n$$

$$N_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_i; N_{kb} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (N_i - N_{cp})^2.$$

С помощью указанных ключевых параметров можно отслеживать изменения в поведении системы, а также идентифицировать некоторые предаварийные состояния, но этих значений может оказаться недостаточно для более глубокого анализа. Для организации более эффективного хранения информации с минимальной потерей данных предлагается провести аппроксимацию измеренного спектрального состава частиц некой аналитической функцией.

Известно, что дисперсный состав (распределение частиц по размерам) многих аэрозольных систем, в частности, атмосферных аэрозолей, описывается логарифмически нормальным законом [2-5]. Тогда в качестве аппроксимирующей функции можно использовать параметризованную функцию логарифмически нормального распределения:

$$N(r) = \frac{N_0}{\sqrt{2\pi\sigma}} \frac{1}{r} e^{-\frac{(\ln(r)-\mu)^2}{2\sigma^2}} + d. \quad (1)$$

Подобный выбор объясняется широким распространением указанного распределения. Так, логарифмически нормальным распределением с двумя модами (максимумы в районе частиц диаметром 0,1-0,3 мкм и 10 мкм) с хорошей точностью описываются атмосферные аэрозоли [5, 6]. Большое число экспериментальных измерений подтверждает наличие логарифмически-нормального распределения во многих дисперсионных и конденсационных аэрозолях [4], а также в большинстве видов пылей промышленного происхождения [7]. Наконец, в отличие от прочих, эмпирически подобранных распределений, логарифмически-

нормальное распределение для некоторых дисперсных систем имеет теоретическое обоснование [4]. Впрочем, процедура аппроксимации с помощью решения системы нелинейных уравнений достаточно универсальна и может быть легко распространена (при соответствующей замене математических выражений) и на другие встречающиеся в научной литературе функции распределения аэрозолей по размерам (укажем, например, распространенные модифицированное гамма-распределение [8] и степенную функцию [9]).

Для аппроксимации необходимо подобрать параметры  $N_0$ ,  $\mu$ ,  $\sigma$ ,  $d$  функции распределения (1). В качестве критерия успешности подбора параметров будем использовать функцию потерь вида:

$$W(N_0, \mu, \sigma, d) = \sum_{i=1}^M [N(r_i, N_0, \mu, \sigma, d) - N_i]^2.$$

Задача подбора параметров сводится к нахождению точки локального минимума функции потерь. Эта задача успешно решается методом Левенберга-Маркара.

Таким образом, вместо сохранения в базе данных информации в виде таблиц достаточно найти параметры аппроксимирующей функции и использовать их для дальнейшего анализа.

Для определения отклонений системы от нормальной работы необходимо анализировать динамику изменения параметров аппроксимирующих функций в различные моменты времени, а также расстояние между ними:

$$R = \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} [N_{t_2}(r) - N_{t_1}(r)] dr,$$

где  $N_{t_1}(r)$  и  $N_{t_2}(r)$  – функции, аппроксимирующие распределения частиц по размерам в момент времени  $t_1$  и  $t_2$  соответственно.

Такие показатели, как возрастание расстояния между аппроксимирующими функциями в различные моменты времени, сдвиг точки экстремума функции распределения, изменение ее формы, характеризуют происходящие в системе процессы и могут быть использованы для проведения диагностики и предотвращения аварий.

## Основные направления использования систем РОАП

Инициатором проведения работ по исследованию генерации частиц в ходе различных технологических процессов является группа исследователей в РНЦ «Курчатовский институт», занимавшихся разработкой систем фильтрации и диагностикой аэрозолей для электронной, а затем и атомной промышленности. Основные эксперименты были проведены на стендах РНЦ «Курчатовский институт», НПО ЦКТИ им. И.И. Ползунова (г. Санкт-Петербург), НПО «Гидропресс», на Курской и Нововоронежской АЭС. Результаты работы докладывались и были одобрены на Научно-техническом совете (НТС) Минатома РФ (ныне Федеральное агентство по атомной энергии), на совещаниях отделения энергетики, машиностроения, механики и процессов управления РАН, а также в концерне «Росэнергоатом» и Институте безопасного развития атомной энергетики (ИБ-РАЭ) РАН. В результате определились основные направления использования систем РОАП: контроль электрооборудования, раннее обнаружение течей и дефектов паропроводов, контроль эффективности воздушных фильтров, контроль механических свойств металлов.

**Контроль электрооборудования.** Перспективность применения мониторинга аэрозолей для контроля электрооборудования была обоснована результатами экспериментальных исследований процессов генерации аэрозолей при моделировании предаварийного состояния электрического оборудования на лабораторных стендах в РНЦ «Курчатовский институт» [2]. Кроме того, были проведены специальные эксперименты, моделировавшие штатный и предаварийный режимы работы электрооборудования, размещенного в производственном помещении.

Для исследований был сконструирован и смонтирован специальный стенд, основным узлом которого является герметичная аэрозольная камера, в которую на время эксперимента помещался исследуемый объект. Аэро-

зольная камера как перед проведением измерений, так и после них продувалась чистым воздухом, поступающим внутрь камеры через высокоэффективные воздушные фильтры. Измерительная часть стенда состояла из лазерного счетчика аэрозолей с подключенными к нему цифровым вольтметром и электронным осциллографом для визуального контроля частоты следования и амплитуды импульсов. Результаты измерений обрабатывались с помощью персонального компьютера.

В первой группе экспериментов измерялся дисперсный состав и счетная концентрация частиц аэрозолей, образующихся в ходе нагрева различных электротехнических узлов и элементов (в том числе при их выходе из строя), а также при нагреве и термическом разрушении изоляционных материалов. Некоторые характерные результаты измерений представлены на рис. 3-6.

Так, ход временной зависимости образования аэрозолей при термодеструкции винила (см. рис. 3), широко применяющегося в электротехнике для изоляции токопроводящих элементов, подтверждает известные наблюдения того, что на ранних стадиях термодеструкции полимерных материалов образуется высокодисперсный аэрозоль с размером частиц менее 0,1 мкм. При этом чувствительности прибора недостаточно для регистрации частиц с диаметром менее 0,3 мкм, поэтому в начальной стадии измерений показания счетчика частиц не изменяются. Далее, по мере роста концентрации высокодисперсных частиц они начинают коагулировать; образовавшиеся частицы, в свою очередь, продолжают коагулировать и т.д. Как только размер вновь образующихся частиц достигает предела чувствительности измерительного прибора, он начинает регистрировать быстрый рост концентрации частиц последовательно во всех диапазонах. Интересно отметить, что «запаздывание» реакции прибора довольно значительно – около часа.

Отметим, что представленные результаты относятся к серии опытов, в которых нагрев

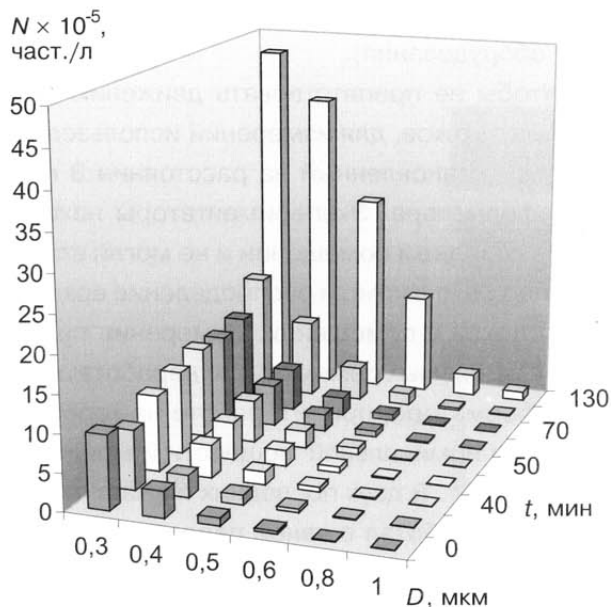


Рис. 3. Дисперсный состав и счетная концентрация аэрозолей, образующихся при нагреве виниловой изоляции

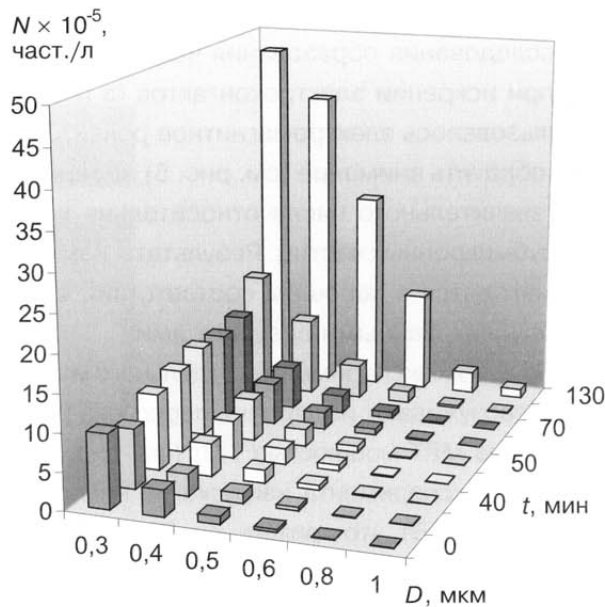


Рис. 4. Дисперсный состав и счетная концентрация аэрозолей, образующихся при искрении электроконтактов

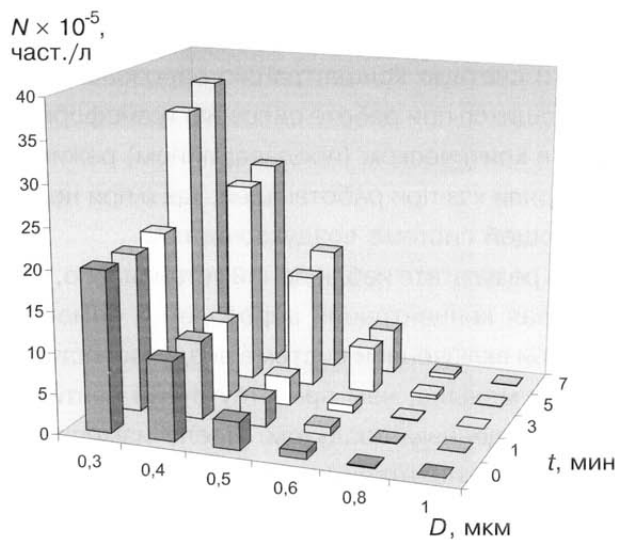


Рис. 5. Дисперсный состав и счетная концентрация частиц аэрозолей, образующихся при перегреве резистора типа МЛТ-1 при мощности 2 Вт

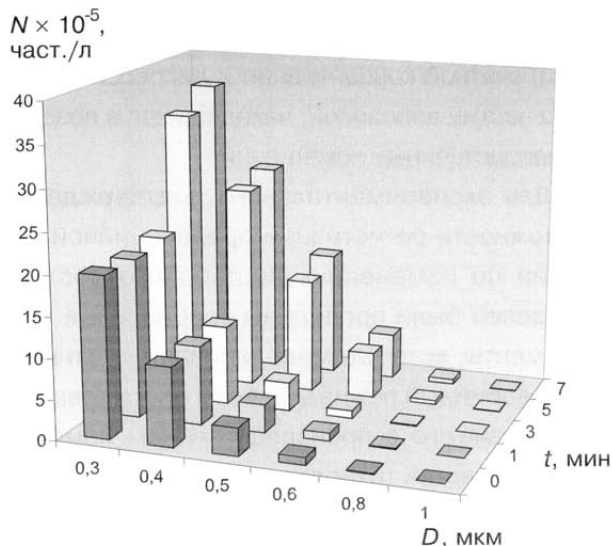


Рис. 6. Дисперсный состав и счетная концентрация частиц аэрозолей, образующихся при работе силового трансформатора в критическом (предаварийном) режиме

изоляции был минимальным. Измерения проводились при мощности нагрева 0,15 Вт и скорости выделения тепла 0,01 кал/с. В опытах при большей мощности нагрева запаздывание при регистрации начала быстрого роста числа субмикронных частиц значительно сокращалось (2-5 мин), а сам рост происходил более стре-

мительно. Таким образом, экспериментально удалось подтвердить возможность регистрации стадии беспламенной термодеструкции изоляционных материалов, предшествующей моменту воспламенения (в зависимости от конкретных условий – от нескольких минут до нескольких часов).

Ко второй группе экспериментов относятся исследования образования частиц аэрозолей при искрении электроконтактов (в опытах использовалось электромагнитное реле). Следует обратить внимание (см. рис. 5) на генерацию значительного числа относительно крупных субмикронных частиц. Результаты измерений находятся в хорошем соответствии с ранее опубликованными результатами.

Из других экспериментов отдельного упоминания заслуживают измерения перегрева резистора типа МЛТ мощностью 1 Вт (см. рис. 5). В процессе эксперимента нагрузка на нем соответствовала 2 Вт, что привело к небольшому почернению эмали. При этом резистор сохранил работоспособность. Проведенные измерения убедительно показали, что работа электротехнологического оборудования, процессы нагрева и эрозии материалов, т.е. многие штатные и, в особенности, нештатные режимы их работы могут сопровождаться изменениями (подчас значительными) счетной концентрации и дисперсного состава частиц аэрозолей, находящихся в воздухе производственных помещений.

Для экспериментального подтверждения возможности регистрации предаварийной ситуации по изменению дисперсного состава аэрозолей были проведены специальные эксперименты, которые моделировали штатный и предаварийный режимы работы оборудования, размещенного в производственном помещении. В качестве технологического объекта был выбран силовой трансформатор номинальной мощностью 250 Вт, размещенный на стойке в центре помещения площадью 60 м<sup>2</sup> (6 × 10 м). В верхней части длинной стены помещения были расположены выходные воздухораспределительные решетки системы очистки воздуха, создававшие воздушный поток чистого воздуха в районе расположения трансформатора. В помещении было постоянно установлено также несколько приборных стоек и технологических установок, которые не включали в период проведения модельных экспериментов, однако они создавали препятствия и помехи распространявшимся в помещении воздушным

потокам (типичная ситуация для технологического оборудования).

Чтобы не препятствовать движению воздушных потоков, для измерений использовали прибор, установленный на расстоянии 3 м от трансформатора. Экспериментаторы находились в соседнем помещении и не могли влиять на генерацию частиц и распределение воздушных потоков в помещении. Измерения проводили в различных режимах: при неработающем трансформаторе, при его работе на холостом ходу, при номинальной мощности и мощности 450 и 540 Вт. В двух последних случаях трансформатор работал с явной перегрузкой, ощутимо грелся, но из строя не выходил, искрения, дыма, оплавления изоляции не наблюдали. Таким образом, моделировали именно предаварийное состояние, когда оборудование работает не в штатном режиме, однако из строя еще не вышло, и видимых признаков нарушения работоспособности нет. Дисперсный состав и счетную концентрацию аэрозолей, образующихся при работе силового трансформатора в критическом (предаварийном) режиме, измеряли как при работающей, так и при неработающей системе воздухоочистки.

В результате наблюдений установлено, что фоновая концентрация аэрозолей в помещении при включенной системе воздухоочистки в 30 раз меньше, чем при отсутствии вентиляции очищенным воздухом. После измерений фоновой концентрации трансформатор включали на холостом ходу и далее – с номинальной нагрузкой. При этом дисперсный состав и счетная концентрация аэрозолей почти не изменялись по сравнению с фоном. Последующее возрастание нагрузки в течение получаса не вызывало изменений в дисперсном составе и привело лишь к незначительному увеличению счетной концентрации. Лишь через час начался рост числа мелких, а затем и более крупных частиц (появление последних объясняется, по-видимому, коагуляцией). Далее процесс пошел значительно быстрее, и в последующие 25 мин концентрация частиц во всех диапазонах увеличилась в 3-4 раза.

При неработающей системе воздухоочистки (см. рис. 6) тот же процесс проходил быстрее (увеличение концентрации стало заметным через 40 мин), что объясняется отсутствием охлаждения трансформатора вентиляционным воздухом. Кроме того, регистрация процесса образования аэрозолей была затруднена из-за большой фоновой концентрации частиц в помещении, и абсолютные значения концентрации лишь в 2-2,5 раза превысили начальный уровень запыленности. Вместе с тем можно отметить, что регистрация изменений дисперсного состава позволяет значительно более уверенно выделить начало процесса образования частиц.

В ходе модельных экспериментов испытуемый объект не был выведен из строя. Для определения возможной реакции прибора на образование дыма и искрение, на расстоянии 0,5 м от трансформатора на 1-2 с зажигали пламя. Скачки концентрации частиц (увеличение минимум в 3 раза) были сразу же зафиксированы прибором. Таким образом, переход от предаварийной (работа с перегрузкой) к аварийной стадии (искрению или перегоранию трансформатора) также был бы сразу зарегистрирован прибором.

При регистрации изменения концентрации и дисперсного состава аэрозолей важнейшим фактором осуществимости измерений является фоновая концентрация частиц в воздухе помещения. На рис. 5 (первая гистограмма по оси времени) приведены экспериментальные данные, отражающие концентрацию и функцию распределения частиц аэрозолей по размерам в типичном технологическом помещении АЭС (по данным работы [3]). Их сравнение с результатами, полученными в ходе модельного эксперимента, позволяет констатировать возможность применения описанного подхода к технологическим помещениям, в том числе имеющим систему очистки воздуха, обеспечивающей низкую фоновую концентрацию аэрозолей.

Проведенные эксперименты позволяют сделать вывод о том, что в области контроля электрооборудования систему РОАП целесооб-

разно применять для мониторинга состояния пультов управления, кабельных каналов, систем автоматики. Применение системы РОАП важно и в связи с исчерпанием ресурса по основному оборудованию. В первую очередь это касается газо- и маслonaполненного оборудования – мощных генераторов и трансформаторов. Предварительные исследования показали, что система РОАП или ее аналог для детектирования твердых частиц и пузырьков в масле может заменить и дополнить существующие дорогостоящие методы анализа неплотностей в газовом охлаждающем контуре генератора и газохроматографический метод анализа масла в трансформаторах.

**Раннее обнаружение течей и дефектов паропроводов.** Обычно утечку из паропровода удастся зафиксировать в лучшем случае в момент, когда ее уже нужно немедленно устранять, и, скорее всего, срочно останавливать работу технологического оборудования. С применением системы РОАП течь можно фиксировать на начальной стадии, причем, в принципе, возможно установить время, за которое она достигнет критического размера и станет опасной. Следовательно, в этом случае появляется возможность выбора: требуется ли аварийная остановка или можно подождать (без большого риска) до планового ремонта оборудования.

Возможность применения системы РОАП в помещениях с большой протяженностью трубопроводов для раннего обнаружения аварийных и предаварийных ситуаций была обоснована результатами экспериментальных исследований на лабораторных стендах в РНЦ «Курчатовский институт», экспериментальном стенде в НПО ЦКТИ им. И.И. Ползунова и промышленном стенде ОКБ «Гидропресс».

При экспериментальных исследованиях в РНЦ «Курчатовский институт» моделировали утечки пара из трубопровода. Исследовалась концентрация и дисперсный состав частиц в воздушной среде помещения в режиме постоянной утечки пара, которая моделировалась работой парогенератора небольшой интенсив-

ности. Выходящая в помещение струйка пара была видна на расстоянии 15-20 см от парогенератора, а далее визуально уже не наблюдалась.

В первой серии экспериментов была доказана принципиальная возможность регистрации утечек водяного пара. Удалось зарегистрировать резкое возрастание счетной концентрации аэрозолей в воздухе даже на значительных расстояниях (до 5 м) от источника водяного пара. При этом рост счетной концентрации в основном приходился на размерный диапазон менее 1 мкм. Полученный результат важен, поскольку в соответствии с теоретическими расчетами время жизни водяных капель в воздушной среде помещения должно быть порядка секунды, что недостаточно для регистрации лазерными счетчиками частиц.

По-видимому, зарегистрированное резкое увеличение концентрации субмикронных частиц в ходе экспериментов можно связать с укрупнением находившихся в воздухе помещения мелких (менее 0,1 мкм) частиц аэрозолей за счет конденсации на них молекул воды. Наибольший рост концентрации приходится на размеры частиц 0,1-0,3 мкм. Поскольку процессы диффузии для частиц таких размеров превалируют над процессами седиментации частиц из воздуха, удастся регистрировать увеличение концентрации субмикронных частиц даже в направлениях, перпендикулярных направлению воздушных потоков в контролируемом помещении.

В этой же серии экспериментов для определения количественных характеристик минимально детектируемой утечки регистрировалась концентрация и дисперсный состав частиц, образующихся при испарении дозируемого количества воды на поверхности нагревательного элемента. При этом использовалась как дистиллированная, так и деминерализованная вода, причем принципиальных отличий в результатах измерений при этом не наблюдалось.

Было обнаружено, что с помощью лазерных датчиков аэрозолей можно регистрировать утечку воды 0,05 мл (две капли воды) на рас-

стоянии до 3 м по направлению потока воздуха из вентиляции. В основном отмечено возрастание концентрации частиц среднего размера. Этот эксперимент демонстрирует высокую чувствительность метода.

Следующая группа измерений проводилась не на стенде, а в одном из технологических помещений РНЦ «Курчатовский институт» площадью 60 м<sup>2</sup>, в котором приточная вентиляция снабжена системой очистки воздуха. В помещении было установлено несколько единиц технологического оборудования, поэтому как условия распространения воздушных потоков, так и чистоту воздуха в помещении можно считать хорошо соответствующими реальным условиям производственных помещений. Счетная концентрация и дисперсный состав частиц в воздушной среде помещения измерялись в режиме постоянной утечки пара из парогенератора небольшой интенсивности (визуально наблюдаемое только на расстоянии 15-20 см от парогенератора). Измерения проводились при включенной системе вентиляции и очистки воздуха. При этом точка пробоотбора располагалась на максимально возможном расстоянии (5 м) от парогенератора в зоне выходной вентиляционной решетки. Таким образом, проводился мониторинг суммарного воздушного потока из помещения.

Результаты измерений представлены на рис. 7.

Видно, что прибор практически сразу (через 4 мин) отреагировал на включение парогенератора резким (в 17-20 раз) увеличением концентрации субмикронных частиц. Парогенератор сразу же был выключен, однако последующие измерения зафиксировали довольно длительное (около 20 мин) остаточное повышение концентрации субмикронных частиц аэрозолей в воздухе помещения. Отметим очень важное обстоятельство: значение относительной влажности, которая измерялась параллельно со счетом частиц аэрозолей, при этом практически не изменилось. Отмечены лишь незначительные колебания от 14,3 % до 15,0 % (рис. 8).

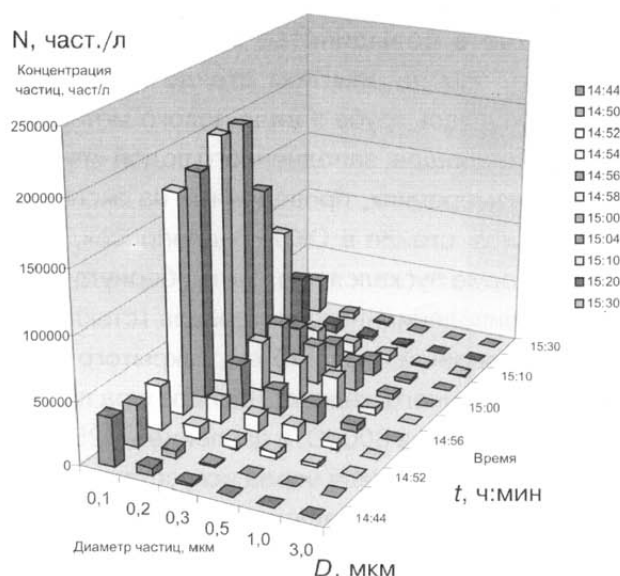


Рис. 7. Дисперсный состав и счетная концентрация частиц аэрозолей, измеренные на расстоянии 5 м от источника пара.

Точка отбора пробы находится в месте выхода воздушного потока из помещения. События по текущей шкале времени: 14:44 – фон; 14:50 – начало генерации пара; 14:58 – генератор пара выключен; 15:00 – остаточное выделение пара; 15:10 – визуально пар не наблюдается

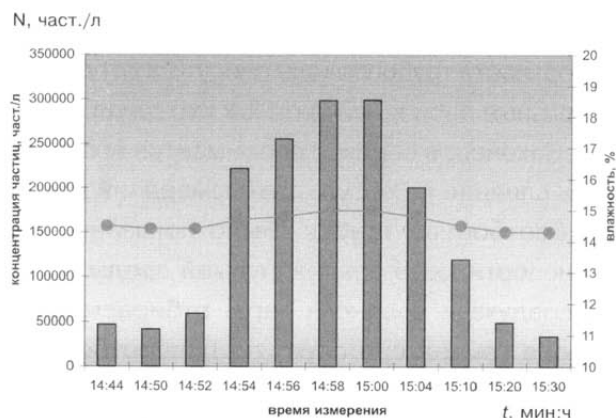


Рис. 8. Зависимость общей счетной концентрации частиц аэрозолей (гистограмма) и влажности (точки) в контролируемом помещении от времени измерений

Интересные результаты по обоснованию возможности применения системы РОАП в уже существующем производственном помещении

были получены в ходе совместного с НПО ЦКТИ им. И. И. Ползунова эксперимента по программе ITER в рамках исследований по концепции «Течь перед разрушением» [10].

В состав стенда входил трубопровод, заполненный пароводяной смесью, нагреваемой до температуры свыше 100 °С при давлении до 40 бар, в котором был искусственно создан дефект (закрытая трещина). При приложении к трубе нагрузки происходило раскрытие дефекта. Измерения проводились при продольной величине дефекта около 4 мм (длина трещины). Истечение пароводяной смеси через дефект наружу регистрировалось лазерным счетчиком аэрозолей. Помещение, в котором был установлен стенд, представляло собой большой производственный зал высотой около 20 м.

В процессе нагрева воды в трубе до температуры 100 °С счетная концентрация и дисперсный состав аэрозолей в воздушной среде помещения существенно не изменялись (трещина «не раскрывалась»). При приложении нагрузки, приводившей к внецентренному растяжению трубы в продольном направлении, произошло раскрытие трещины. Расход пароводяной смеси через сквозной дефект составил 2 мл/мин, а счетная концентрация частиц увеличилась во всех диапазонах размеров.

При изменении давления в трубе с паром (нагрев свыше 100 °С) также происходило раскрытие трещины, что вызывало рост счетной концентрации частиц в диапазоне размеров менее 1 мкм, указывавшего на конденсационный механизм образования аэрозолей.

В дальнейшем продольные размеры дефекта увеличили до 8 мм. В этом случае при раскрытии трещины расход пароводяной смеси через сквозной дефект составил 150, а затем и 300 мл/мин, а счетная концентрация частиц увеличилась во всех диапазонах размеров. Следует также отметить, что фоновая концентрация аэрозолей в помещении была гораздо больше, чем при проведении первой серии экспериментов, и составляла около 120000 част./л.

Важным является изучение механизма образования аэрозолей воды. При высоких тем-

пературах воды или пара в трубе из трещины (дефекта) выходит перегретый пар, который быстро охлаждается в воздухе, и происходит или спонтанная конденсация, или конденсация на фоновых аэрозолях в воздухе с превращением струи пара в поток аэрозолей. В этом случае возможен большой коэффициент преобразования воды, выходящей из трещины, в капельную фазу. При низких температурах (меньше 100 °С) указанный механизм не является преобладающим. При большом давлении воды будет происходить распад струи на мелкие капли, которые также будут зарегистрированы спектрометром аэрозолей. В этом случае коэффициент преобразования воды, выходящей из трещины, в аэрозоли будет мал. При малом давлении на внешнем срезе трещины, из-за сложного характера пути движения воды по трещине или из-за малого давления в трубе, струя образовываться не будет и такую утечку аэрозольным методом обнаружить невозможно. Указанные особенности образования аэрозолей воды показывают, что данный метод измерения наиболее чувствителен в случае изучения течи в трубопроводах с температурой больше 100 °С и повышенным давлением. Для измерения абсолютного количества вытекшей из трещины воды надо каждый раз проводить тарирование системы обработки данных спектрометра аэрозолей с учетом механизма образования аэрозолей и их «жизни» до регистрации, т.е. для разных помещений и температур коэффициент пересчета будет разным.

Измерения, проведенные в ЦКТИ, показали, что с помощью системы РОАП на базе мониторинга воздушной среды возможна регистрация аэрозолей, генерируемых трубой с паром при наличии микротрещины, через которую пар выходит наружу. Концентрация и дисперсный состав аэрозолей зависят от расхода пароводяной смеси, а также от температуры и давления воды в трубопроводе. Значительная концентрация крупных частиц указывает на то, что в основном работает механизм распада струи воды из-за рэлеевской неустойчивости.

Однако структура трубопроводов на производстве в большинстве случаев гораздо сложнее, чем на опытном стенде ЦКТИ, где использовалась труба в виде полого металлического цилиндра, заполненного водой или паром. В измерениях, проведенных на экспериментальном стенде в ОКБ «Гидропресс», труба, в которую пускался пар, была обернута слоем теплоизоляционного материала (стекловолокно) толщиной около 10 см, закрытого слоем оцинкованного железа. Температура пара в трубе составляла 300 °С, а давление – 125 атм. Расход теплоносителя через искусственно образованный в трубе дефект составлял 450 мл/мин. Пробоотборник прибора располагался вне трубы. Практически сразу после пуска в трубу пара прибор четко зафиксировал увеличение концентрации частиц в воздухе в диапазоне размеров, меньших 1 мкм. Это вполне согласуется с расчетами, так как простые оценки показывают, что осаждение водных аэрозолей с размерами капель менее 1 мкм на волокнистой теплоизоляции с толщиной волокон 10-50 мкм будет мало (см., например, [11]).

В результате, в условиях полупромышленного стенда было установлено, что путем мониторинга воздуха можно зафиксировать утечку пара из трубопровода даже в случае, если на поверхности трубопровода присутствуют дополнительные слои изоляционных материалов.

Наконец, в серии экспериментов проверялось влияние на результаты измерений длины пробоотборных трубок. Было показано, что транспортировка анализируемой среды (смеси воздуха и водяного пара, отбираемой на выходе генератора пара) по пробоотборным магистралям длиной 1,5-10 м не приводит к уменьшению счетной концентрации, т.е. к потере представительности пробы. Это связано, по-видимому, с дополнительной конденсацией водяных паров на содержащихся в воздухе твердых частицах, что компенсирует потери за счет инерционного осаждения и испарения некоторых частиц.

Таким образом, в ходе исследований была доказана высокая эффективность применения

мониторинга аэрозолей для обнаружения нарушений герметичности трубо- и паропроводов, испарении жидкостей, истечении под давлением пароводяных и иных смесей. При этом экспериментально установлено:

- возможность регистрации увеличения концентрации и изменения дисперсного состава аэрозолей при испарении воды либо при непрерывной утечке;
- возможность регистрации сверхмалых количеств воды (капли объемом порядка нескольких микролитров);
- возможность отбора проб воздуха с использованием пробоотборных трубок длиной до 12 м;
- возможность регистрации утечек пароводяной смеси через дефекты в трубах, имеющих слой теплоизоляции;
- целесообразность регистрации утечек пароводяной смеси путем мониторинга аэрозолей в суммарном воздушном потоке.

**Контроль эффективности воздушных фильтров.** Важным дополнительным преимуществом применения систем мониторинга аэрозолей является возможность их параллельного использования для контроля эффективности воздушных фильтров, в том числе непосредственно в месте их установки.

Например, в настоящее время на АЭС контролируются только радиоактивные аэрозоли. В то же время в условиях нормальной эксплуатации станции активность воздушных выбросов незначительна. Таким образом, величина активности, измеряемая после воздушных фильтров, редко бывает статистически достоверна. При нормальной работе АЭС, когда концентрация активных аэрозолей в помещениях и в вентиляционных системах низка или отсутствует (начальный период работы, пусковые режимы, безаварийные режимы, когда отсутствуют протечки и т.п.), метод неработоспособен и в ряде случаев службы эксплуатации АЭС просто не имеют возможности контролировать состояние фильтров.

Датчики аэрозолей, используемые в системе РОАП для АЭС, могут измерить счетную

концентрацию не только радиоактивных, а всех частиц после воздушного фильтра. Таким образом, можно получить значительно более достоверную величину эффективности воздушного фильтра. Более того, при измерении можно получить значения не только интегральной, но и дифференциальной (т.е. для каждого размера частиц) эффективности фильтра, что увеличивает информативность измерений.

Наконец, применение датчиков контроля аэрозолей на АЭС позволит контролировать очистку воздуха, поступающего на станцию через систему приточной вентиляции. Наличие такого контроля актуально для АЭС, возводимых в местностях, характеризующихся повышенным содержанием пыли в атмосфере (например, в районах пустынь).

Приведенные соображения актуальны не только для АЭС, поскольку очистка поступающего в технологическую зону воздуха в настоящее время становится обязательным условием для практически любого современного высокотехнологического производства.

**Контроль механических свойств металлов.** Мониторинг аэрозолей является основой совершенно нового метода контроля механических свойств металлов по генерации аэрозолей в результате механических воздействий.

В ходе предварительных экспериментов было установлено, что счетная концентрация и дисперсный состав аэрозолей (в диапазоне размеров 0,1-2,0 мкм), образующихся при механической обработке металлических образцов, зависят от твердости и хрупкости материала. Особенно характерно возрастание вылета крупных частиц (с диаметром 1-2 мкм) для образцов хрупких сталей.

В другой серии экспериментов была исследована генерация аэрозолей при разрыве металлических стержневых образцов [12-13]. Эксперименты проводились на разрывной машине с образцами (диаметр образцов составлял 4 мм, длина – около 100 мм) из необлученной и облученной реакторной стали марки 15Х2МФА (образцы подвергались воздействию нейтронного излучения с флюенсом  $6 \times 10^{19}$  см<sup>-2</sup>

2). При испытании образцы находились в изолированной камере цилиндрической формы, воздух в которую поступал через высокоэффективный фильтр.

Разрыв необлученных образцов сопровождался резким возрастанием уровня счетной концентрации частиц во всех диапазонах размеров частиц (табл. 2).

Таблица 2

Генерация аэрозолей при разрыве необлученных металлических стержней  
стали марки 15Х2МФА

| Текущее время,<br>мин : с | Уровни концентрации частиц, част./л при диаметрах частиц, мкм |            |            |            |            |            | Примечания |
|---------------------------|---------------------------------------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
|                           | 0,1-0,2                                                       | 0,2-0,3    | 0,3-0,5    | 0,5-1,0    | 1,0-2,0    | >2,0       |            |
| 0:00                      | 73                                                            | 10         | 1          | 1          | 0          | 0          | Фон        |
| 4:22                      | 102                                                           | 14         | 3          | 0          | 0          | 1          | Растяжение |
| 5:02                      | 98                                                            | 15         | 8          | 1          | 3          | 18         | Растяжение |
| 5:44                      | 123                                                           | 15         | 2          | 1          | 2          | 0          | Растяжение |
| 6:22                      | <b>1359</b>                                                   | <b>419</b> | <b>688</b> | <b>616</b> | <b>243</b> | <b>305</b> | Разрыв     |
| 7:00                      | 560                                                           | 89         | 36         | 12         | 16         | 15         | –          |
| 8:14                      | 508                                                           | 82         | 17         | 0          | 1          | 0          | –          |
| 9:10                      | 470                                                           | 57         | 14         | 0          | 0          | 0          | –          |

Аналогичный эффект наблюдался и при разрыве образцов из облученной стали (табл. 3). Однако, в отличие от предыдущего эксперимента, при разрыве образцов из облученной стали счетная концентрация частиц возросла до

значительно больших значений. Значительные отличия наблюдались и в распределении образующихся частиц по размерам – отмечена генерация больших частиц (диаметром более 2 мкм).

Таблица 3

Генерация аэрозолей при разрыве облученных металлических стержней  
стали марки 15Х2МФА

| Текущее время,<br>мин : с | Уровни концентрации частиц, част./л при диаметрах частиц, мкм |             |             |             |             |              | Примечания |
|---------------------------|---------------------------------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|------------|
|                           | 0,1-0,2                                                       | 0,2-0,3     | 0,3-0,5     | 0,5-1,0     | 1,0-2,0     | >2,0         |            |
| 0:00                      | 56                                                            | 10          | 2           | 1           | 1           | 2            | Фон        |
| 0:38                      | 34                                                            | 6           | 1           | 1           | 6           | 6            | Растяжение |
| 1:27                      | 21                                                            | 5           | 8           | 3           | 2           | 5            | Растяжение |
| 2:06                      | 24                                                            | 9           | 18          | 9           | 6           | 6            | Растяжение |
| 2:45                      | <b>4844</b>                                                   | <b>3071</b> | <b>6605</b> | <b>9988</b> | <b>7173</b> | <b>16304</b> | Разрыв     |
| 3:28                      | 1587                                                          | 286         | 356         | 646         | 552         | 522          | –          |
| 4:08                      | 1520                                                          | 206         | 184         | 617         | 596         | 762          | –          |
| 4:47                      | 1590                                                          | 243         | 414         | 994         | 577         | 379          | –          |
| 5:37                      | 1539                                                          | 253         | 373         | 557         | 192         | 134          | –          |
| 6:15                      | 1468                                                          | 202         | 224         | 284         | 83          | 48           | –          |
| 6:54                      | 1942                                                          | 255         | 221         | 182         | 56          | 33           | –          |
| 8:12                      | 2289                                                          | 328         | 157         | 28          | 3           | 3            | –          |

Отметим, что механические характеристики материала для необлученных и облученных образцов отличались следующим образом: предел текучести  $\sigma_{0,2}$  составил 490 и 620 МПа, предел прочности  $\sigma_B$  – 610 и 730 МПа, общее относительное удлинение  $\delta_0$  – 12 % и 9 % и равномерное относительное удлинение  $\delta_r$  – 8 % и 6 % соответственно. Таким образом, зарегистрировано резкое (на порядки) увеличение ге-

нерации крупных частиц при исследовании разрыва образцов облученных и необлученных сталей, тогда как механические свойства, измеренные традиционными способами, изменились лишь на 10-20 %.

Продолжением этих исследований стала попытка обнаружить зависимость между усталостными повреждениями в материале (при малоцикловой усталости) и количеством, а так-

же дисперсным составом аэрозолей, образующихся при механическом воздействии на поверхность образца [14].

Эксперименты проводились со стандартными образцами диаметром 4 мм, длиной около 120 мм. Образцы выполнены из стали Ст3. Первые измерения параметров образующихся аэрозолей проводились для исходного образца (условно – материал без усталостных повреждений). Затем образец изгибался под углом  $90^\circ$  и выпрямлялся, что составляло 1 цикл нагружения. После определённого количества циклов и вплоть до разрушения исследовалась генерация частиц при механическом воздействии (обработка абразивным материалом) на образец. Все измерения проводились в обеспыленной атмосфере с низким уровнем фоновой концентрации частиц (в однонаправленном вертикальном потоке чистого воздуха после высокоэффективного фильтра).

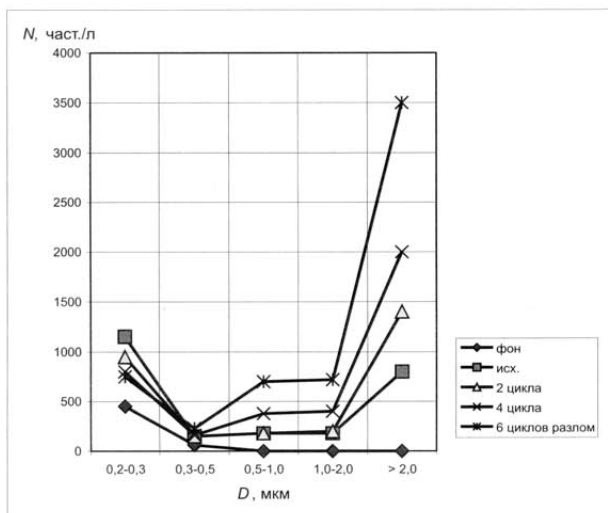


Рис. 9. Генерация аэрозолей при механическом малоцикловом воздействии на образец (фоновая счетная концентрация частиц; исходный образец; образец после 2 циклов нагружения; образец после 4 циклов нагружения, образец после 6 циклов нагружения – разлом образца)

Экспериментальные результаты (рис. 9) указывают на значительное увеличение генерации крупных частиц (более 2 мкм) при повышении степени усталости материала. Значительное увеличение генерации частиц в диа-

пазоне 0,5-2,0 мкм наблюдается при переходе от 4 к 6 циклам нагружения. Количество образующихся частиц в интервале размеров 0,3-0,5 мкм остается практически неизменным, а для частиц 0,2-0,3 мкм наблюдается некоторое снижение уровня генерации.

Полученные результаты создали основу для разработки прибора, с помощью которого при использовании относительно неразрушающего метода воздействия на поверхность по регистрации генерируемых частиц будет определяться степень радиационных и усталостных повреждений металла. Метод достаточно прост и дешев, он может быть использован для многих измерений, необходимых для продления сроков эксплуатации объектов энергетики, на транспорте, в строительстве.

### Области применения системы РОАП

Исходя из принципа действия системы РОАП можно сформулировать требования для ее применения в целях регистрации частиц в воздухе. Объект, оснащаемый системой РОАП, должен обладать следующими свойствами.

1. Запыленность воздуха на объекте не выше  $2 \times 10^4$  част./л для аэрозолей 0,5 мкм.
2. Высокая цена аварии на объекте.
3. Требование уменьшения времени регламентных работ по предотвращению аварии.

Очевидно, что система раннего обнаружения аварийных и предаварийных состояний может представлять интерес для объектов с высокой ценой аварии, таких, как объекты энергетики (в том числе АЭС), центры и системы управления, стартовые комплексы ракет, космические станции, системы радио и телевидения, центры сбора информации и управления газо- и нефтепроводов и электросетей, заводы по переработке ядерного топлива и др. Измерения степени усталостного повреждения металла очень важны для транспорта, строительных конструкций и многого другого.

Это все достаточно разнородные объекты, поэтому подход к оснащению их системой РОАП будет различаться, иначе говоря, систе-

ма должна быть адаптирована к каждому объекту с учетом характерных аварий.

### **Список литературы**

1. Александров П.А., Калечиц В.И. Раннее предупреждение аварийных ситуаций по мониторингу микрочастиц // ТЭК. 2003. № 2. С. 110-111.
2. Александров П.А., Калечиц В.И., Маслаков О.Ю. Мониторинг аэрозолей и раннее обнаружение предаварийных и аварийных ситуаций // Атомная энергия. 2000. Т. 89. Вып. 5. С. 376-381.
3. Двухименный В.А., Бондарев В.В. Результаты измерений характеристик аэрозольных частиц в вентсистемах атомных электростанций и эффективности работы систем фильтрации // В сб.: Аэрозоли: наука, приборы, вычислительные программы и технологии в России и странах СНГ. 1996. № 12. С. 2.
4. Фукс Н.А. Механика аэрозолей. – М.: Изд-во АН СССР, 1955. С. 20-21.
5. Применение лазеров для определения состава атмосферы. – Л.: Гидрометеиздат, 1983. С. 10-11.
6. Батчер С., Чарлсон Р. Введение в химию атмосферы. – М.: Мир, 1977. С. 194-200.
7. Ужов В.Н., Вальдберг А.Ю., Мягков Б.И., Решидов И. К. Очистка промышленных газов от пыли. – М.: Химия, 1981. – 392 с.
8. Дейрменджан Д. Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами. – М.: Мир, 1971. – 165 с.
9. Мак-Картни Э. Оптика атмосферы. – М.: Мир, 1979. – 167 с.
10. Александров П.А., Калечиц В.И., Хозяшева Е.С., Чечуев П.В. Детектирование малых течей в трубопроводах по мониторингу аэрозолей / В кн.: Научная сессия МИФИ-2004 // Сб. науч. тр. Т. 9. Молекулярная физика, перспективные наукоемкие технологии, новые материалы, наноматериалы. – М.: МИФИ, 2004. С. 222-223.
11. Двухименный В.А., Столяров Б.М., Чёрный С.С. Системы очистки воздуха от аэрозольных частиц на АЭС. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 88 с.
12. Александров П.А., Калечиц В.И., Хозяшева Е.С., Чечуев П.В. Исследование генерации микрочастиц, образующихся при разрыве металла // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2003. № 5. С. 95-98.
13. Александров П.А., Калечиц В.И., Хозяшева Е.С., Чечуев П.В. Исследование генерации частиц при разрыве металла // Вопросы атомной науки и техники, серия «Термоядерный синтез». 2003. Вып. 3. С. 73-77.
14. Александров П.А., Калечиц В.И., Хозяшева Е.С., Шахов М. Н. Исследование генерации частиц при малоцикловом механическом нагружении механических образцов / В кн.: Научная сессия МИФИ-2004 // Сб. науч. тр., т. 9. Молекулярная физика, перспективные наукоемкие технологии, новые материалы, наноматериалы. – М.: МИФИ, 2004. С. 224-225.