

## МНОГОУРОВНЕВАЯ ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА КАК ИНСТРУМЕНТ УПРАВЛЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТЬЮ И НАДЁЖНОСТЬЮ ОБЪЕКТОВ НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ

Спасибов В.М., Земенков Ю.Д., Бастриков С.Н.,  
Земенкова М.Ю., Чижевская Е.Л.

Тюменский индустриальный университет, Россия  
625000, г.Тюмень, ул. Володарского, 38: [spasibovvm@tyuiu.ru](mailto:spasibovvm@tyuiu.ru)

### MULTILEVEL TECHNICAL DIAGNOSTICS AS A TOOL FOR MANAGING THE SAFETY AND RELIABILITY OF OIL AND GAS FACILITIES

Spasibov V.M., Zemenkov Y.D., Bastrikov S.N., Zemenkova M.Y., Chizhevskaya E.L.

Industrial University of Tyumen, Russia

38, Volodarskiy str., Tyumen, 625000: [spasibovvm@tyuiu.ru](mailto:spasibovvm@tyuiu.ru)

**Keywords:** *multilevel diagnostics, reliability management, hazardous conditions, safety of process facilities*

**Summary.** The activity of industrial facilities of the fuel and energy complex is associated with ensuring the reliability, and safety of technological processes and technical diagnostics is one of the effective tools for solving this problem. Of particular importance in this case is the early prediction of an emergency situation for objects with a high accident price. At the same time, two aspects are important. Firstly, it is impossible to miss the signal about the beginning of the development of abnormal operation of the equipment, which inevitably leads to an accident; secondly, it is necessary to clearly filter out false signals, since they can lead to an unmotivated shutdown of the equipment and economic losses. The way out of this situation is possible in the integration of various methods, so that various hindrances, fundamental for one method, have a weak effect on the results given by another method.

The paper considers three diagnostic methods: brittle strain-sensitive coatings, acoustic emission and generation of aerosol particles. The research presented in the paper is aimed at studying the method of early diagnosis of dangerous conditions of objects by combining the methods discussed above. The paper presents the results of experiments in assessing the loading of test samples before plastic deformation and destruction are achieved, which allow us to conclude that a multi-level diagnostic method is possible for early warning of the occurrence of a pre-emergency condition of the object.

© 2023 Earth Science Division, Azerbaijan National Academy of Sciences. All rights reserved.

### 1. Актуальность

Осуществление деятельности предприятий в современных условиях сопряжено с большим количеством факторов риска, среди которых важную роль играют угрозы безопасности и надежности функционирования хозяйствующих субъектов. Еще в начале XXI века промышленно развитые страны, в первую очередь Россия и США, в качестве одного из основных элементов государственной политики в области национальной безопасности выдвинули задачу защиты критически важных объектов от угроз и чрезвычайных ситуаций техногенного, природного характера, а также от террористических действий. Большинство предприятий нефтегазового комплекса – это сложно построенные технологиче-

ские объекты, деятельность которых связана с повышенным риском, поэтому они относятся к категории опасных производственных объектов (ОПО). Более того объекты нефтегазовой отрасли относятся к потенциально опасным и критически важным для национальной безопасности объектам, одним из действенных инструментов эффективного управления которыми является формирование стратегии совершенствования технологий мониторинга безопасности и надежности с учетом требований действующих директивных документов федерального и отраслевого уровня (Земенкова, 2018; Zemenkova et al., 2020, 2021). Обеспечение соблюдения требований федерального законодательства, международных соглашений, отраслевых стандартов и норм, ре-

главными направлениями деятельности в области промышленной безопасности, является обязанностью как нефтегазовых компаний, так и контролирующих органов, общественных организаций. Несмотря на повышенное внимание компаний вопросы создания информационной базы данных, упреждающего мониторинга надежности, безопасности, экологичности промышленных объектов, действующих в режиме реального времени, остаются открытыми и актуальными.

По материалам документа «Основы промышленной политики РФ в области промышленной безопасности (ПБ) до 2025 года и дальнейшую перспективу» (Указ Президента №198) в РФ зарегистрировано более 170 тыс. опасных производственных объектов, причем 60-70% оборудования отработало нормативные сроки службы, а социально-экономический ущерб от аварий может оцениваться в 600-700 млрд. рублей (Zemenkova et al., 2021). Объективно раннее предсказание аварийной ситуации имеет большое значение, особенно для объектов с высокой ценой последствий аварии. Это связано с тем, что по сигналам ранней диагностики становится возможным остановить процесс развития аварийной ситуации до перехода её в необратимую фазу, когда уже приходится разбираться с последствиями аварии – человеческими жертвами и огромными экономическими потерями. В этой деятельности крайне важны два аспекта. Во-первых, никак нельзя пропустить сигнал о начале развития нештатной ситуации в работе оборудования, неминуемо приводящей к аварии; во-вторых, необходимо чётко отфильтровывать ложные сигналы, так как они могут привести к немотивированной остановке оборудования и экономическим потерям.

Для решения задачи диагностирования и раннего предупреждения о возникновении предаварийного состояния объекта исследования применяют различные средства технической диагностики и неразрушающего контроля (ТД и НК): локальные, интегральные и расчётные. К локальным средствам относят тензометрический, визуальный, ультразвуковой, магнитный, радиационный и вихревой контроль (Клюев, 2003). Они, как правило, могут дать точечную информацию о напряжённо-деформированном состоянии конструкции на месте их установки (тензорезисторы, ультразвуковые преобразователи и радиационные устройства) или зарегистрировать факт начала разрушения конструкции (системы видеонаблюдения). К интегральным средствам диагностирования относятся акустико-эмиссионный метод, термоэмиссионный, рентгенографический, а также метод фотоупругих и хрупких

покрытий (Kobayashi, 1987; Махутов и др., 2011). Другим направлением НК можно считать метод счётной концентрации аэрозолей в контролируемом пространстве (Райст, 1987), активно развиваемый в настоящее время для диагностики состояния технически сложных и опасных систем. Принцип регистрации отдельных микрочастиц представляет возможности обнаружения аварийных ситуаций различной природы. Это связано с тем, что практически любое значительное изменение режима работы систем или нарушение хода технологических процессов сопровождается резким увеличением выбросов микрочастиц в сопредельном пространстве. В процессе испытания и эксплуатации диагностируемых объектов эти методы позволяют получать интегральную картину напряжённо-деформированного состояния в зоне исследования, своевременно обнаруживать развивающиеся напряжения, определять пространственные координаты разрушения, устанавливать их характер и степень опасности.

Применение существующих методов НК для диагностирования объектов не является достаточной мерой, которая обеспечивает предупреждение и предотвращение разрушений. Целесообразно проводить мониторинг, сочетая различные методы диагностики, что обусловлено необходимостью, во-первых, учета факторов, влияющих на повреждаемость конструкций, а во-вторых, повышения вероятности выявления потенциально опасных и сложно идентифицируемых дефектов с применением других методов контроля. Комплексное использование методов диагностики, наряду с повышением вероятности обнаружения мест повреждения объектов, позволит более достоверно определять напряжённо-деформированное состояние элементов конструкций, контролировать усадки, регистрировать смещения и нарастание деформаций в несущих элементах конструкции, оценивать их текущее состояние и выделять зоны, наиболее подверженные опасности разрушения.

При одновременном применении различных методов важно учитывать, чтобы различные помехи, принципиальные для одного метода, оказывали слабое влияние на результаты, получаемые с использованием другого. Такой подход в совокупности с адекватной обработкой результатов позволит выдавать надёжные данные в начале аварийного развития процесса. Например, для нефтегазовой отрасли – области, где цена аварии действительно очень высока, в целях предотвращения разрыва магистрального трубопровода высокого давления предпочтительным является иметь методы диагностики, основанные на разных физических принципах. Речь идёт о методах,

перспективной целью которых является определение времени безопасной работы оборудования при обнаружении сигнала о начале аварийного процесса. Это даёт возможность при наличии модели развития аварийной ситуации принять обоснованное решение – немедленно останавливать работу либо без серьёзной опасности продолжать работу оборудования до следующего планового ремонта. Такой подход сулит существенные экономические выгоды, но требует создания моделей аварии и методов ранней диагностики комплексного вида.

Работа направлена на исследование способа многоуровневой диагностики штатных и опасных состояний технических объектов, включающего совместное применение трёх методов диагностики: акустическая эмиссия, генерация аэрозольных частиц и хрупкие тензочувствительные покрытия. Известна высокая чувствительность первых двух методов к механическим напряжениям металлов. Для ещё большего повышения чувствительности к напряжениям используется хрупкое покрытие основного металла, в котором трещины появляются значительно раньше, чем в собственно металле. Появление трещин сопровождается акустической эмиссией и генерацией аэрозольных частиц. Таким образом, применяется три различных метода ранней диагностики в реальном времени. Результаты исследований первого этапа их совместного применения продемонстрированы в данной статье.

## 2. Методы исследования

Экспериментальные исследования, с целью оценки возможности реализации способа многоуровневой диагностики состояний технических объектов, осуществлялись посредством нагружения двух образцов (№3 и №4) с хрупким тензочувствительным покрытием и двух образцов (№1 и №2) без покрытия до уровня достижения пластической деформации и разрушения опытных образцов, регистрации сигналов акустической

эмиссии (АЭ) и концентрации аэрозольных частиц. Исследования проводились на экспериментальной базе Федерального государственного бюджетного учреждения «Институт машиноведения им. А.А.Благодатова Российской академии наук». В качестве образцов использовались плоские пластины толщиной 2 мм из высокопрочного алюминиевого сплава В95. Согласно справочным данным (Серенсен и др., 1975) сплав В95 имеет следующие механические характеристики:  $\sigma_B = 520$  МПа,  $\sigma_{0.2} = 440$  МПа,  $E = 0.7 \cdot 10^{-5}$  МПа. На рис.1 приведены основные размеры испытываемого образца, а также показаны места установки оксидного тензоиндикатора и широкополосных преобразователей акустической эмиссии (ПАЭ) G 200, используемых для регистрации сигналов акустической эмиссии в процессе нагружения образцов.

Следует отметить, что ПАЭ устанавливались на противоположной относительно оксидного тензоиндикатора стороне образца. На самом же тензоиндикаторе в средней его части герметично крепилась приёмная камера, позволяющая регистрировать выбросы микрочастиц в процессе образования трещин в оксидной плёнке тензоиндикатора с применением лазерного аэрозольного счетчика Lighthouse Handheld 3106. В качестве хрупких покрытий использовались оксидные тензоиндикаторы, разработанные ИМАШ и предназначенные для проведения исследований в области упругих и упругопластических деформаций (от 400 до 4000 мкм/м) при температурах от  $-200$  до  $+200^\circ\text{C}$  в различных средах (вода, масло, жидкий азот) в течение длительного времени эксплуатации (не менее 5 лет). Хрупкий оксидный тензоиндикатор (Пригоровский, Панских, 1978; Пригоровский, 1983) представляет собой тонкую алюминиевую фольгу, подвергнутую электрохимическому анодированию для получения оксидной пленки  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (толщиной 10–40 мкм) и наклеенную на исследуемый элемент конструкции.

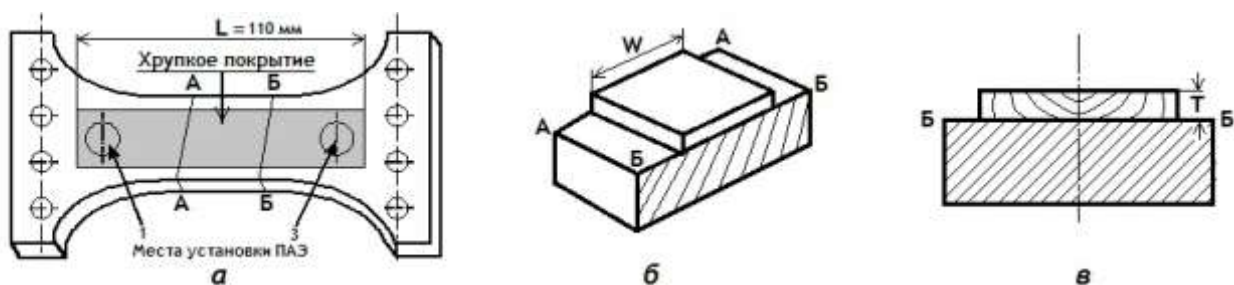


Рис. 1. Схема расположения ПАЭ на испытательном образце (а); сечение образца и хрупкого покрытия (б); схема образования и распространения трещины в хрупком покрытии (в)

При возникновении в подложке алюминиевой фольги деформаций  $\varepsilon_1$ , превышающих величину пороговой деформации  $\varepsilon_0$  (для образца №3 – 1000 мкм/м и 1500 мкм/м для образца №4), в оксидной пленке тензоиндикатора образуются картины трещин, отражающие поле наибольших деформаций на поверхности конструкции. Используя характеристики тензочувствительности тензоиндикаторов ( $\varepsilon_0, \sigma_0$ ) и график изменения численности трещин в оксидной пленке ( $\Psi$ ) от уровня деформаций в подложке, представляется возможным произвести оценку значений наибольших деформаций (напряжений) на поверхности исследуемой конструкции в области распространения трещин с погрешностью не большей 20%.

Нагружение образцов при испытаниях производилось на электрогидравлической установке MTS, позволяющей создавать усилие до 50 т, и проводить испытания как в ручном, так и автоматическом режиме нагружения с заданной скоростью приложения нагрузки. При этом диаграмма нагружения может быть построена в координатах нагрузка – время, либо нагрузка – удлинение.

С целью настройки применяемой аппаратуры, определения уровня нагрузок, требуемых для пластического деформирования и разрушения объектов исследования, отработки оптимальных режимов нагружения были проведены тестовые испытания образцов (№1 и №2) без тензопокрытий.

Образец устанавливался в захваты верхней и нижней траверсы испытательного стенда, после чего к нему через слой смазки крепились широкополосные преобразователи акустической эмиссии G 200 (рис. 2).

При проведении экспериментов для исследования метода АЭ применялась многоканальная многопараметрическая акустико-эмиссионная система A-Line 32D и широкополосные акустико-эмиссионные преобразователи (ПАЭ) G-200 с резонансной частотой 150 кГц. Предварительные усилители имели полосу пропускания 30-500 кГц, а коэффициент усиления 26 дБ. При испытаниях образцов использовались два ПАЭ, устанавливаемые на расстоянии 110 мм, как показано на рис.1. Скорость ультразвуковых волн при вычислении координат источников АЭ принималась равной 3000 м/с.

Перед проведением испытаний исследуемых образцов была выполнена калибровка ПАЭ и каналов аппаратуры АЭ. При калибровке использовались:

- имитатор АЭ – источник Су-Нильсена;
- электронный калибратор АЕСАL-2 (фирма РАС (США)).



Рис. 2. Вид образца с тензопокрытием и преобразователями сигналов АЭ на стенде MTS

Используемая в процессе испытаний многоканальная многопараметрическая акустико-эмиссионная система, регистрируя и обрабатывая импульсы АЭ, формирует блок информации, характеризующий поступившее в канал событие:

- время регистрации сигнала – момент времени первого превышения порога дискриминации;
- время нарастания импульса – интервал между началом импульса и моментом, когда амплитуда достигнет максимальной величины;
- длительность импульса – интервал между началом импульса и моментом, когда амплитуда сигнала станет ниже порога дискриминации;
- количество выбросов импульсов – число пересечений установленного порогового уровня амплитуды внутри сигнала;
- амплитуду импульса – максимальное значение амплитуды сигнала;
- энергию импульса.

### 3. Результаты и обсуждение

Согласно принятому в Механике и Физике Разрушения положению «Акустическая эмиссия (АЭ) – испускание объектом контроля (испытаний) акустических волн» (Иванов и др., 2005), данное определение охватывает весьма широкий круг явлений. В данной работе с целью диагностики процессов разрушения оксидных тензоиндикаторов и подложки при испытаниях образцов на разрыв регистрировалась акустическая эмиссия материалов. Данный метод АЭ позволяет класси-

фицировать дефекты не по размерам, а по степени их влияния на прочность объекта. В такой классификации может оказаться, что большие по размерам дефекты попадут в класс неопасных, не требующих ремонта элементов конструкции.

Как при пластической деформации, так и при образовании и росте трещин, которые являются импульсными процессами, основным элементом сигнала АЭ является единичный импульс, образующийся за счёт разрыва атомной связи. Разрыв носит скачкообразный характер, он сопровождается релаксацией других атомных связей и излучением импульса упругих колебаний от места разрыва. Этот элементарный импульс АЭ, который можно описать в терминах квантовой механики, был назван фрактоном (Иванов и др., 2005). Энергия такого элементарного импульса составляет единицы эВ. При пластической деформации, являющейся процессом массового образования и движения дислокаций, генерируется последовательность импульсов, которая после прохождения акустико-электронного канала, включающего Источник АЭ → Контролируемый объект → Преобразователь АЭ → Система АЭ, трансформируется в акустический сигнал, представленный на рис. 3.

Регистрация сигналов АЭ представляет собой импульсный стохастический процесс, составляющий поток импульсов, которые можно

принять отдельно, либо слившимися в непрерывный поток, как это видно из записи сигналов на рис. 3. В параметрах этого процесса и зависимостях от времени и нагрузки содержится информация о состоянии деформирования и разрушения диагностируемого объекта. При этом основными наиболее информативными параметрами и зависимостями процесса АЭ являются: зависимость суммы импульсов АЭ, активности АЭ, амплитуды импульсов АЭ, энергии АЭ от времени и нагрузки.

На рис. 4 показаны этапы нагружения и зависимости параметров АЭ при упругой и пластической деформации гладких образцов на растяжение.

Этапы от 0 деформации до  $\Delta l = 1$  мм соответствуют упругому участку деформирования. Сигналы АЭ, зарегистрированные на этом участке, возникают в результате релаксации напряжений на неоднородностях структуры образцов. Активная АЭ возникает при начале пластической деформации материала. Для реального объекта глобальная пластическая деформация не допускается. Поэтому необходим индикатор, свидетельствующий, что деформации не достигли критического уровня. Таким индикатором и служит хрупкое тензопокрывание с величиной пороговой деформации значительно меньшей предела текучести материала диагностируемой конструкции.

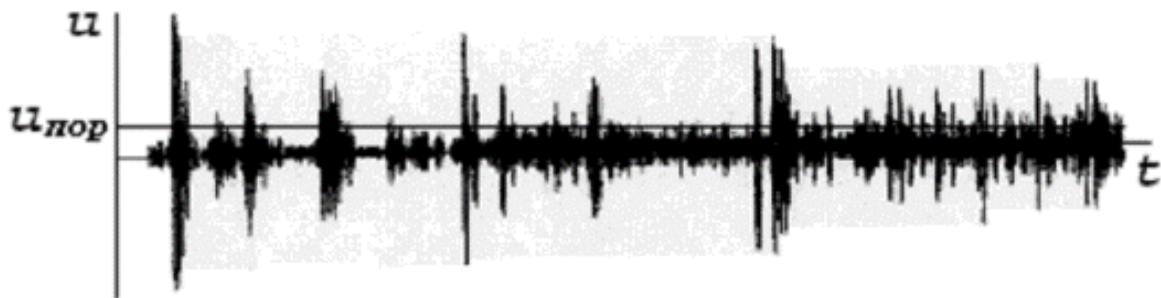


Рис. 3. Запись процесса АЭ, полученная при натурных испытаниях

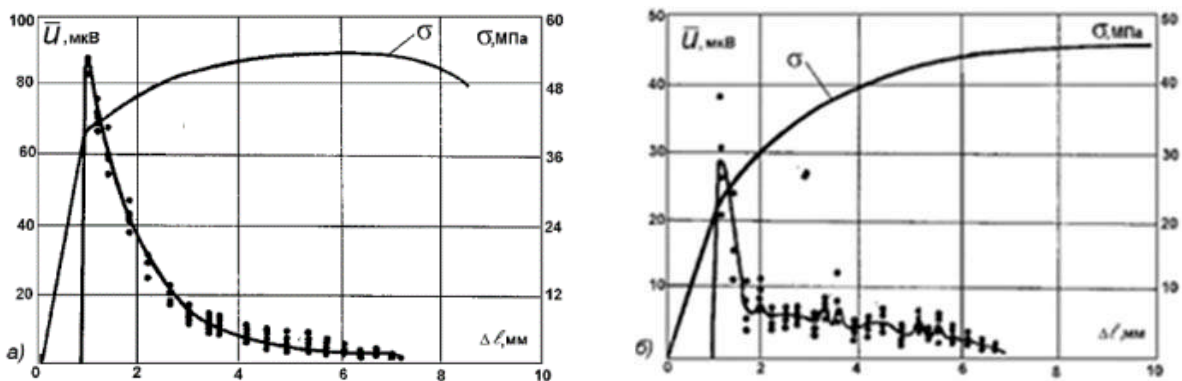


Рис. 4. Зависимости среднеквадратического значения АЭ  $\bar{u}$  и механического напряжения  $\sigma$  от удлинения  $\Delta l$  при растяжении гладких образцов из стали 10ГН2МФА (а) и стали 10 (б)

Результаты выполненных исследований по диагностике процесса разрушения оксидных тензоиндикаторов и материала подложки при испытаниях образцов №1-4 на разрыв приведены на рис. 5-8. При этом на всех графиках параметров акустической эмиссии отражено изменение уровня растягивающего усилия на образце.

**Диагностика процесса разрушения образца №1 при испытании на разрыв.** На рис. 5 приведены графики изменения *суммы импульсов АЭ (N)* и уровня нагрузки (*P*) от времени ( $\tau$ ).

*Активность АЭ* пропорциональна нагрузке, она возрастает при приближении к области пла-

стической деформации и уменьшается после начала пластической деформации (рис. 5а, 5б).

*Амплитуда* сигналов АЭ (рис. 5в) максимальна при уровне нагрузки, соответствующей началу пластической деформации материала, и достигает 75 дБ. *Энергия* АЭ сигналов при этом составляет 105 дБ (рис. 5г). Затем *амплитуда* и *энергия* сигналов АЭ заметно падает и составляет перед разрушением образца 55 и 90 дБ соответственно.

**Диагностика процесса разрушения образца №2 при испытании на разрыв.** На рис. 6 приведены графики изменения *суммы импульсов АЭ (N)* и уровня нагрузки (*P*) от времени ( $\tau$ ).

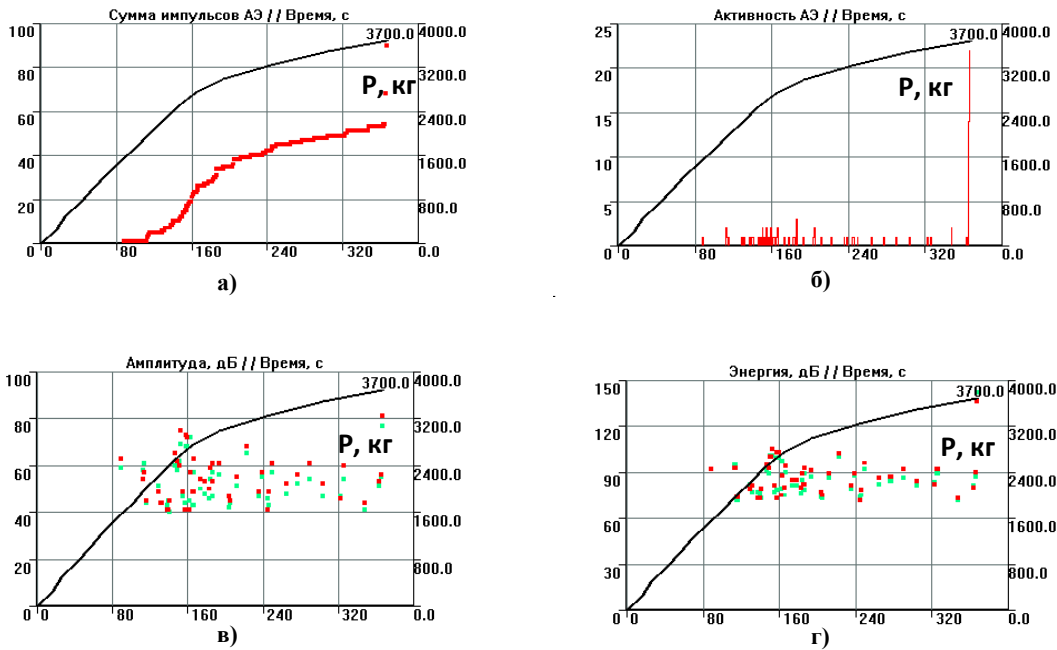


Рис. 5. Параметры сигналов АЭ, регистрируемые при испытании образца №1

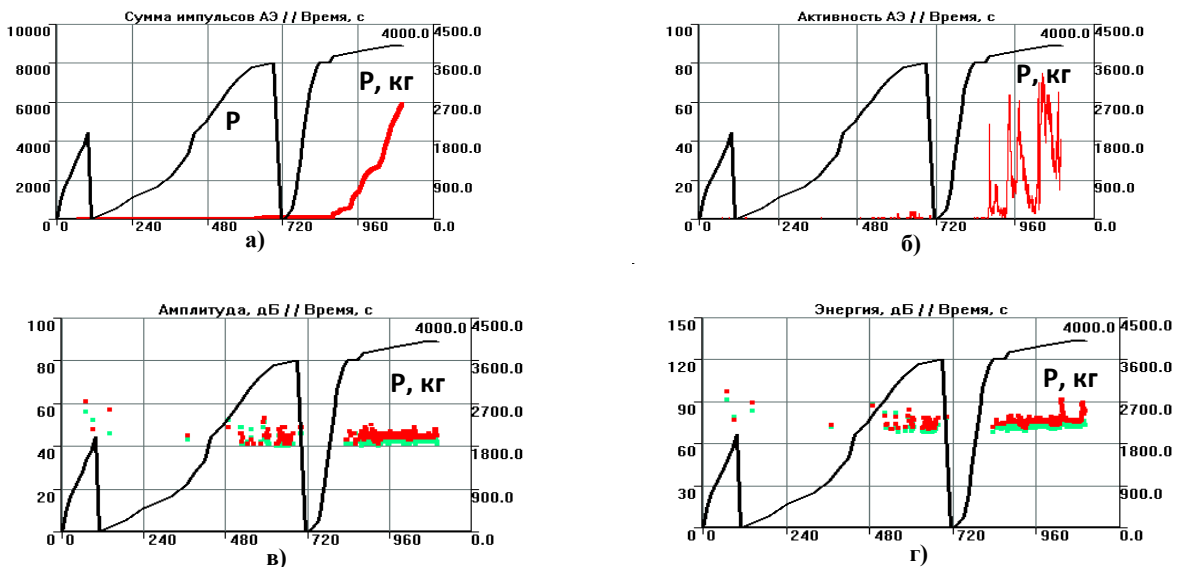


Рис. 6. Параметры сигналов АЭ, регистрируемые при испытании образца № 2



**Активность** АЭ (рис. 6а и 6б) возрастает в начале области пластической деформации при  $P=27$  кН. Затем **активность** АЭ резко возрастает при нагружении свыше  $P=36$  кН. **Амплитуда** единичных АЭ сигналов (рис. 6в) максимальна в области упругой деформации и достигает 60 дБ. **Энергия** АЭ сигналов – 95 дБ (рис. 6г). С ростом **активности амплитуда** и **энергия** сигналов АЭ заметно падает до 52 и 80 дБ соответственно. При повторном нагружении и перед разрушением **амплитуда** сигналов АЭ не превышает 50 дБ, энергия – 90 дБ.

**Диагностика процесса разрушения образца №3 (с тензопокрытием) при испытании на разрыв.** На рис. 7 приведены графики изменения **суммы импульсов АЭ (N)** и уровня нагрузки ( $P$ ) от времени ( $\tau$ ).

Активная регистрация сигналов АЭ (рис. 7а и 7б) начиналась при  $P=5.8$  кН (в области упругих деформаций) и продолжается до 25.0 кН. Дальнейшее увеличение нагрузки сопровождалось новым ростом активности АЭ, что наблюдалось на всех циклах нагружения образца. Наибольшая **активность** АЭ имела место при повышении нагрузки от 40 до 42.5 кН. При выдержке на этом уровне **активность** сигналов АЭ заметно уменьшилась, а на этапе разгрузки образца не наблюдалась. АЭ вновь была зарегистрирована после подъема нагрузки до 42.50 кН

и резко возросла по истечении 60 секундной выдержки при 42.5 кН, что свидетельствовало о высоком уровне пластических деформаций в зоне разрушения образца, когда её рост происходил без увеличения нагрузки. На этапе разгрузки образца активность АЭ упала до нуля. В следующем цикле нагружения **активность** АЭ наблюдалась уже при малых значениях нагрузки и постоянно возрастала вплоть до момента разрушения.

**Амплитуда** сигналов АЭ достигает максимума уже на первых циклах испытания при повышении нагрузки от 15 до 30 кН (рис. 7в) и составляет 90-95 дБ, а максимальная **энергия** достигает 130 дБ (рис. 7г). В последующих циклах, несмотря на повышение нагрузки и **активности** АЭ, **амплитуда** и **энергия** АЭ сигналов заметно падает (до 50 и 80 дБ соответственно). Усредненные значения **амплитуды** и **энергии** сигналов АЭ в дальнейшем заметно падают, несмотря на рост нагрузки. В момент разрушения **амплитуда** и **энергия** сигналов АЭ составляют 50 и 90 дБ соответственно.

**Диагностика процесса разрушения образца №4 (с тензопокрытием) при испытании на разрыв.** На рис. 8 приведены графики изменения **суммы импульсов АЭ (N)** и уровня нагрузки ( $P$ ) от времени ( $\tau$ ).

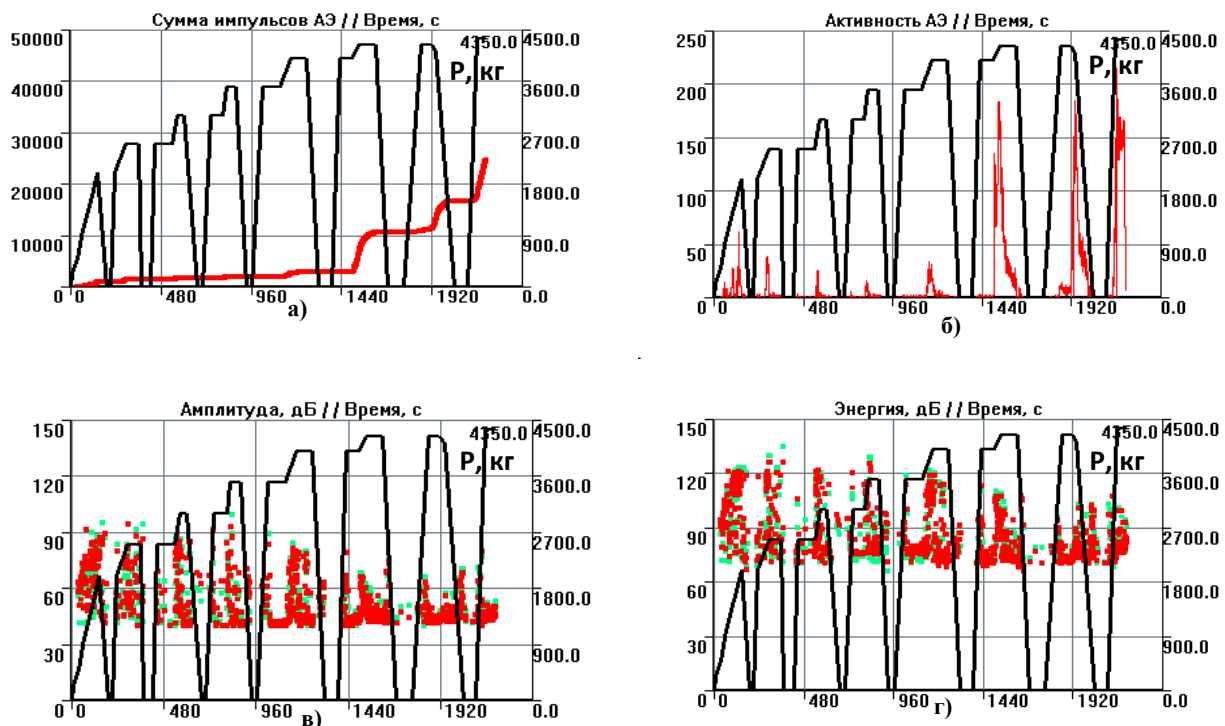


Рис. 7. Параметры сигналов АЭ, регистрируемые при испытании образца №3

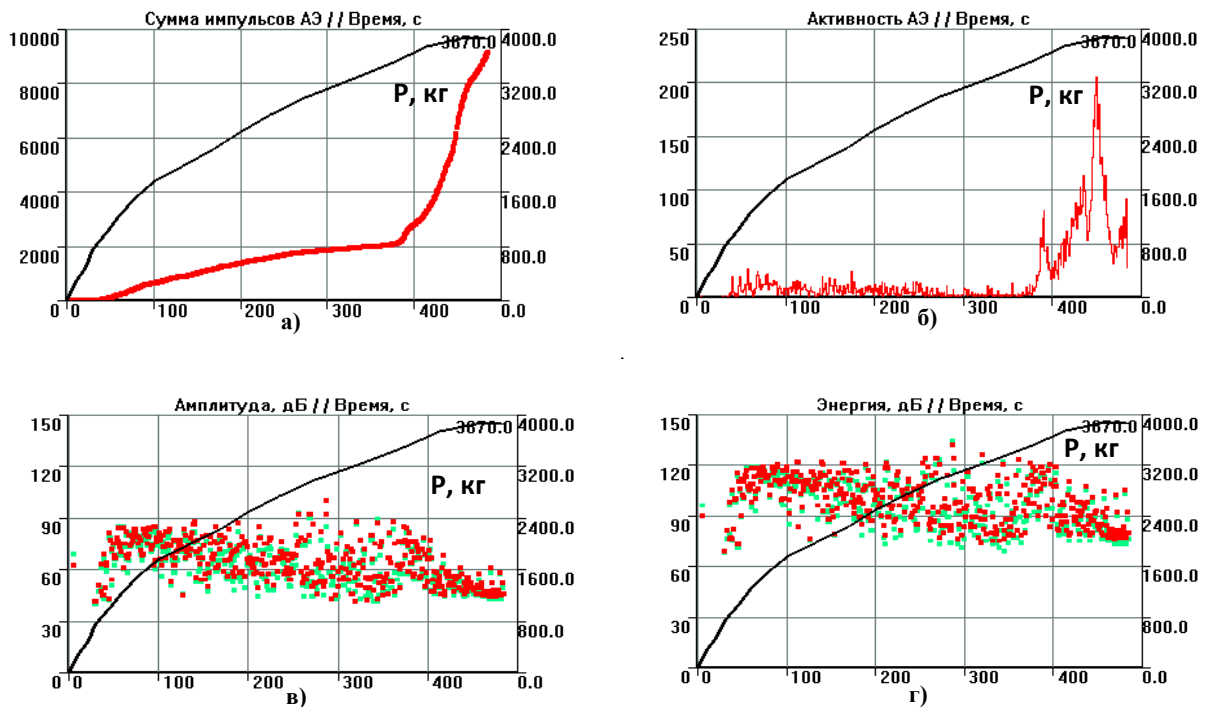


Рис. 8. Параметры сигналов АЭ, регистрируемые при испытании образца №4

**Активность** сигналов АЭ (рис. 8а, 8б) заметна уже в начале области упругой деформации при  $P=7.5$  кН и постепенно возрастает с ростом нагрузки до уровня  $P=34.5$  кН, соответствующей началу перехода материала образца в область пластической деформации. Затем **активность** сигналов АЭ резко повышается и достигает своего максимума при  $P=38.25$  кН, после чего активность АЭ заметно снижается и вновь возрастает лишь перед разрушением образца.

**Амплитуда** сигналов АЭ достигает 90 дБ уже в начале нагружения и повышается до 95 дБ при  $P=34.50$  кН (рис. 8в). При этом **энергия** сигналов АЭ достигает 125 дБ (рис. 8г). С ростом **активности** сигналов АЭ **амплитуда** и **энергия** сигналов заметно падает до 60 и 105 дБ соответственно. Перед разрушением образца **амплитуда** АЭ сигналов не превышает 60 дБ, а энергия – 90 дБ.

**Сравнительный анализ результатов диагностики образцов №2 и №4.** Так как диаграммы нагружения этих образцов были близки, то представляется интересным сопоставить результаты акустико-эмиссионной диагностики образца №2 (без тензоиндикатора) и образца №4 (с тензоиндикатором).

**Активность АЭ.** Образец №4 – **активность** АЭ наблюдается уже при нагрузке 8 кН и постепенно возрастает до уровня, соответствующего области пластической деформации. Затем резко возрастает в начальный момент структурной перестройки, потом падает и вновь возрастает перед разрушением образца (рис. 8б).

Образец №2 – **активность** АЭ резко возрастает в области пластической деформации и растет вплоть до разрушения (рис. 8б).

Общее число зарегистрированных сигналов АЭ в образце №4 оказалось в полтора раза больше, чем в образце №2 (рис. 8а и 8а).

**Вывод:** **Активность** АЭ в образце №4 в области упругих деформаций вызвана образованием трещин в тензоиндикаторе. В области пластической деформации **активность** АЭ вызвана структурной перестройкой материала подложки и его разрушением.

#### **Амплитуда АЭ сигналов**

Образец №4 – максимальная **амплитуда** до 85 дБ наблюдается в области упругих деформаций, затем снижение уровня до 55 дБ перед разрушением образца (рис. 8в).

Образец №2 – максимальная **амплитуда** до 50 дБ в начале области пластической деформации, затем снижение до 45 дБ перед разрушением образца (рис. 8в).

**Вывод:** сигналы АЭ с большой **амплитудой** в образце №4 вызваны образованием трещин в тензопокрывтии, сигналы АЭ с малой **амплитудой** вызваны структурной перестройкой и разрушением материала подложки.

#### **Энергия сигналов АЭ**

Образец №4 – максимальная энергия до 125 дБ наблюдается в области упругой и малых упруго-пластических деформаций, затем снижение до 100 дБ перед разрушением образца (рис. 8г).



Образец №2 – максимальная энергия до 90 дБ в начале области пластической деформации, затем снижение до 75 дБ перед разрушением образца (рис. 6г).

**Вывод:** сигналы АЭ с большой энергией в образце №4 вызваны образованием трещин в тензопокрывтии, сигналы АЭ с малой энергией в области пластических деформаций вызваны структурной перестройкой и разрушением материала подложки.

#### 4. Заключение

1. Акустико-эмиссионная диагностика состояния оксидных тензоиндикаторов и материала подложки, проведенная при испытаниях образцов на разрыв, показала высокую эффективность предложенного метода неразрушающего контроля. Экспериментально полученные основные параметры сигналов АЭ в процессе разрушения оксидных тензоиндикаторов и материала подложки могут быть использованы в системах многоуровневой диагностики и раннего предупреждения о возникновении и развитии опасных состояний в контролируемых объектах.

2. Совместное использование оксидных тензоиндикаторов и акустико-эмиссионной системы A-Line 32D позволило с высокой степенью надежности контролировать весь процесс нагружения образцов, начиная от упругих деформаций порядка 0.05% и до значительных пластических деформаций 5-7%, при которых происходило их разрушение. При этом по уровню активности сигналов АЭ, их амплитуде и энергии можно

контролировать динамику изменения напряженного состояния, возникновение зон пластических деформаций, их рост, предельное состояние образцов перед разрушением.

3. Сигналы АЭ, вызываемые образованием трещин в тензоиндикаторах и возникающие при структурных изменениях и разрушении материала подложки, достаточно хорошо различаются по таким параметрам, как амплитуда, энергия и активность АЭ.

4. Разрабатываемый многоуровневый метод комплексной диагностики, наряду с повышением вероятности обнаружения мест накопления повреждений, позволяет с высокой степенью надежности контролировать нагруженность диагностируемого объекта, сигнализируя о возникновении потенциальных угроз (по скорости и уровню роста деформаций) задолго до возникновения необратимых структурных изменений в материале конструкции.

5. Использование многоуровневого метода комплексной диагностики позволит обеспечить решение важнейшей задачи управления современным предприятием – обеспечения устойчивого, безопасного и надежного функционирования за счет раннего предупреждения и предотвращения аварийных ситуаций и ущербов, в том числе в условиях опасных производственных объектов.

*Авторы благодарят за поддержку данного исследования национальный проект «Наука и университеты» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (FEWN-2021-0012).*

#### ЛИТЕРАТУРА

- Земенкова М.Ю. Методологическое обеспечение экспертных систем мониторинга показателей надежности объектов трубопроводного транспорта углеводородов. ТИУ. Тюмень, 2018, 411 с.
- Иванов В.И., Власов И.Э. Метод акустической эмиссии. В книге: Неразрушающий контроль: Справочник. Том 7. Книга 1. Машиностроение. Москва, 2005, 340 с.
- Махутов Н.А., Шемякин В.В., Ушаков Б.Н., Петерсен Т.Б., Васильев И.Е. Применение акустической эмиссии для контроля за процессом образования трещин в хрупких оксидных тензоиндикаторах. Заводская лаборатория. Диагностика материалов, Том 77, No. 6, 2011, с.41-44.
- Клюев В.В. (под ред.). Неразрушающий контроль и диагностика. Справочник 2-е изд. Машиностроение. Москва, 2003, 656 с.
- Пригоровский Н.И. Методы и средства определения полей деформаций и напряжений. Машиностроение. Москва, 1983, 248 с.
- Пригоровский Н.И., Панских В.К. Метод хрупких тензочувствительных покрытий. Наука. Москва, 1978, 183 с.
- Райст П. Аэрозоли. Введение в теорию. Мир. Москва, 1987, 278 с.
- Серенсен С.В., Когаев В.П., Шнейдерович Р.М. Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность. Машиностроение. Москва, 1975, 488 с.

#### REFERENCES

- Ivanov V.I., Vlasov I.E. Acoustic emission method. In the book: Non-destructive testing: A Reference book. Vol. 7. Book 1. Mechanical engineering. Moscow, 2005, 340 p. (in Russian).
- Kobayashi A.S. Handbook on experimental mechanics. Prentice-Hall. Society for Experimental Mechanics, Inc. New Jersey, 1987, 1002 p., <https://doi.org/10.1111/j.1747-1567.1989.tb01038.x>.
- Makhutov N.A., Shemyakin V.V., Ushakov B.N., Petersen T.B., Vasiliev I.E. The use of acoustic emission to control the process of crack formation in brittle oxide strain gauges. Factory laboratory. Diagnostics of materials, Vol. 77, No. 6, 2011, pp. 41-44 (in Russian).
- Klyuev V.V. (ed.). Non-destructive testing and diagnostics. Handbook. 2nd ed. Mechanical Engineering. Moscow, 2003, 656 p. (in Russian).
- Prigorovsky N.I. Methods and means of determining fields of deformations and stresses. Mechanical engineering. Moscow, 1983, 248 p. (in Russian).
- Prigorovsky N.I., Panskikh V.K. The method of brittle strain-sensitive coatings. Nauka. Moscow, 1978, 183 p. (in Russian).
- Raist P. Aerosols. Introduction to theory. Mir. Moscow, 1987, 278 p. (in Russian).
- Serensen S.V., Kogaev V.P., Shneiderovich R.M. Load-bearing capacity and calculations of machine parts for strength. Me-

Kobayashi A.S. Handbook on experimental mechanics. Prentice-Hall. Society for Experimental Mechanics, Inc. New Jersey, 1987, 1002 p., <https://doi.org/10.1111/j.1747-1567.1989.tb01038.x>.

Zemenkova M.Y., Gladenko A.A., Zemenkov Y.D. Innovative intelligent technologies for predictive reliability and risk management in oil and gas transport and storage systems. AIP Conference Proceedings. Omsk, Vol. 2285, 2020, pp. 050012, <https://doi.org/10.1063/5.0029598>.

Zemenkova M.Yu., Gladenko A.A., Zemenkov Yu.D., Chizhevskaya E.L., Polyanskaya O.I. Timely intellectual control of safety and reliability of operation of power-mechanical equipment during transportation of oil and petroleum products. AIP Conference Proceedings, Omsk, Vol. 2412, 2021, pp. 060020, <https://doi.org/10.1063/5.0075848>.

chanical engineering. Moscow, 1975, 488 p. (in Russian).

Zemenkova M. Yu. Methodological support of expert monitoring systems for reliability indicators of hydrocarbon pipeline transport facilities. TIU. Tyumen, 2018, 411 p. (in Russian).

Zemenkova M.Y., Gladenko A.A., Zemenkov Y.D. Innovative intelligent technologies for predictive reliability and risk management in oil and gas transport and storage systems. AIP Conference Proceedings. Omsk, Vol. 2285, 2020, pp. 050012, <https://doi.org/10.1063/5.0029598>.

Zemenkova M.Yu., Gladenko A.A., Zemenkov Yu.D., Chizhevskaya E.L., Polyanskaya O.I. Timely intellectual control of safety and reliability of operation of power-mechanical equipment during transportation of oil and petroleum products. AIP Conference Proceedings, Omsk, Vol. 2412, 2021, pp. 060020, <https://doi.org/10.1063/5.0075848>.

## МНОГОУРОВНЕВАЯ ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА КАК ИНСТРУМЕНТ УПРАВЛЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТЬЮ И НАДЁЖНОСТЬЮ ОБЪЕКТОВ НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ

Спасибов В.М., Земенков Ю.Д., Бастриков С.Н., Земенкова М.Ю., Чижевская Е.Л.

Тюменский индустриальный университет, Россия  
625000, г.Тюмень, ул. Володарского, 38: [spasibovvm@tyuiu.ru](mailto:spasibovvm@tyuiu.ru)

**Резюме.** Деятельность промышленных объектов топливно-энергетического комплекса сопряжена с обеспечением надежности и безопасности осуществления технологических процессов, и техническая диагностика является одним из действенных инструментов решения этой задачи. Особо важное значение при этом имеет раннее предсказание аварийной ситуации для объектов с большой ценой аварии. Это связано с тем, что по сигналам ранней диагностики оказывается возможным прекратить процесс развития аварийной ситуации до перехода её в необратимую фазу, когда уже придётся разбираться с последствиями аварии – человеческими жертвами и огромными экономическими потерями. При этом важны два аспекта. Во-первых, нельзя пропустить сигнал о начале развития нештатной работы оборудования, неминуемо приводящей к аварии; во-вторых, необходимо чётко отфильтровывать ложные сигналы, так как они могут привести к немотивированной остановке оборудования и к экономическим потерям. Выход из этой ситуации возможен в комплексировании различных методов с тем, чтобы различные помехи, принципиальные для одного метода, оказывали слабое влияние на результаты, даваемые другим методом. В работе рассмотрены три метода диагностики: хрупкие тензочувствительные покрытия, акустическая эмиссия и генерация аэрозольных частиц. Для ещё большего повышения чувствительности к механическим напряжениям основного металла используется хрупкое покрытие основного металла, в котором трещины появляются значительно раньше, чем в собственно металле. Появление трещин сопровождается акустической эмиссией и генерацией аэрозольных частиц. Исследования, представленные в работе, направлены на изучение способа ранней диагностики опасных состояний объектов, посредством совмещения рассмотренных выше методов. В статье представлены результаты экспериментов при оценке нагружения испытательных образцов до достижения пластической деформации и разрушения, позволяющие сделать вывод о возможности способа многоуровневой диагностики осуществления раннего предупреждения о возникновении предаварийного состояния объекта.

**Ключевые слова:** многоуровневая диагностика, управление надежностью, опасные состояния, безопасность технологических объектов

## NEFT-QAZ SAHƏSİ OBYEKT LƏRİNİN TƏHLÜKƏSİZLİYİ VƏ ETİBARLILIĞININ İDARƏ EDİLMƏSİ VASİTƏSİ KİMİ ÇOXSƏVİYYƏLİ TEXNİKİ DİAQNOSTİKA

Spasibov V.M., Zemenkov Yu.D., Batrikov S.N., Zemenkova M.Yu., Çijevskaya E.L.

Tümen Sənaye Universiteti, Rusiya  
625000, Tümen şəhəri, Volodarski küçəsi, 38: [spasibovvm@tyuiu.ru](mailto:spasibovvm@tyuiu.ru)

**Xülasə.** Yanacaq-energetika kompleksinin sənaye istehsalı obyektlərinin fəaliyyəti texnoloji proseslərin həyata keçirilməsinin etibarlılığının və təhlükəsizliyinin təmin edilməsi ilə bağlıdır. Qəza dərəcəsinin yüksək olduğu obyektlər üçün qəza vəziyyətinin əvvəllər proqnozlaşdırılması xüsusi əhəmiyyətə malikdir. Bu onunla əlaqədardır ki, erkən diaqnostika siqnalına görə qəzanın nəticələri – insan qurbanları və böyük iqtisadi itkilər ilə məşğul olmaq məcburiyyətində qaldıqdan əvvəl qəza vəziyyətinin inkişaf prosesini dayandırmaq mümkündür. Bu baxımdan diaqnostika fəvqəladə halların qarşısını almaq və istehsalın stabil fəaliyyətini təmin etmək üçün qeyd edilən mühüm problemin həllində və istehsal obyektinin vəziyyətinin idarə edilməsində ən təsirli vasitələrdən biridir. Aparılan tədqiqat üç diaqnostik metodun: akustik emissiya, aerozol hissəciklərinin əmələ gəlməsi və kövrək gərginliyə həssas örtüklərin birləşməsinə nəzərdə tutan texniki obyektlərin müntəzəm və təhlükəli vəziyyətlərinin çoxsəviyyəli diaqnostikası metodunun öyrənilməsinə yönəlib. Bu metodların əsas metalın mexaniki gərginliyinə qarşı yüksək həssaslığı məlumdur. Gərginliyə qarşı həssaslığı daha da artırmaq üçün əsas metalın kövrək örtüyündən istifadə olunur, burada metalın özündən əvvəl onun çatları meydana çıxır. Çatların yaranması akustik emissiya və aerozol hissəciklərinin generasiyası ilə müşayiət olunur. Məqalədə plastik deformatsiyaya və dağıntıya çatan qədar sınaq nümunələrinin artmasının qiymətləndirilməsində bu üsulların birgə istifadəsi ilə bağlı təcrübələrin nəticələri təqdim olunur və bu, çoxsəviyyəli diaqnostika metodunun obyektin fəvqəladə haldan əvvəl vəziyyətin baş verməsi barədə xəbərdarlığı qabaqcadan həyata keçirmək üçün mümkün olduğu qənaətinə gəlməyə imkan verir.

**Açar sözlər:** çoxsəviyyəli diaqnostika, etibarlılığın idarə edilməsi, təhlükəli vəziyyətlər, texnoloji obyektlərin təhlükəsizliyi