

В. В. Иванов, А. Ю. Чибисов, И. В. Енютин

Система мониторинга технического состояния трубопроводов

Рассматривается вопрос создания системы непрерывного мониторинга технического состояния оборудования ТЭК для прогнозирования, выявления, анализа и оценки рисков аварий на опасных производственных объектах, в том числе на трубопроводах. Показано, что анализ прочности, ресурса и надежности объектов ТЭК и НГК должен базироваться на максимально точной оценке их технического состояния средствами НК и ТД, в том числе путем создания автоматизированных систем технического мониторинга.

Ключевые слова: безопасность технических объектов, трубопроводы, прочность, напряженно-деформированное состояние, ресурс, мониторинг, диагностика, тензометрия, моносulfид самария.

Об авторах

Иванов Валерий Викторович — коммерческий директор ЗАО «МПОТК «ТЕХНОКОМПЛЕКТ», г. Дубна, Московская область.

Чибисов Александр Юрьевич — советник генерального директора ЗАО «МПОТК «ТЕХНОКОМПЛЕКТ», г. Дубна, Московская область.

Енютин Игорь Валентинович — технический директор ООО «Турбоэнергоремонт», г. Санкт-Петербург.

Предприятия топливно-энергетического и нефтегазового комплекса (ТЭК и НГК) характеризуются высокими эксплуатационными давлениями и температурами рабочего тела, присутствием пожаро- и взрывоопасных продуктов и сырья, что создаёт опасность возникновения крупных техногенных аварий и катастроф. Только за 2007—2011 гг. произошло 84 опасных события, в том числе 41 взрыв, 30 пожаров и 13 аварий с выбросом опасных веществ [1; 2], причем более 30 % таких событий происходит на трубопроводах. Общий прямой материальный ущерб за 2011 г. составил более 1 млрд. руб.

Анализ прочности, ресурса и безопасности сложных технических систем базируется на представлении об основных видах штатных и аварийных (проектных, запроектных и гипотетических) ситуаций, определяемых по таким параметрам, как локальные напряжения σ и деформации ϵ , число циклов N , температура t и время τ эксплуатации, которые варьируются в чрезвычайно широких пределах ($100 \leq N \leq 1012$, $-270 \text{ }^\circ\text{C} \leq t \leq 2000 \text{ }^\circ\text{C}$, $100 \text{ с} \leq \tau \leq 80 \text{ лет}$).

Системы контроля (диагностики и/или

мониторинга) технических систем должны строиться на основе научных исследований прочности R_σ , ресурса $R_{N,\tau}$, надежности $P_{P,R}$, живучести $L_{l,d}$, безопасности S , риска R и защищенности Z . В качестве базовых параметров эксплуатационных воздействий P^3 принимаются эквивалентные эксплуатационные напряжения σ^3 , деформации ϵ^3 , числа циклов N^3 , время τ^3 , температура t^3 , внешняя среда Φ^3 (радиация, коррозия, электромагнитное поле), коэффициенты концентрации α_σ , интенсивности напряжений K_I^3 и деформаций K_{Ie}^3 :

$$P^3 = \{\sigma^3, \epsilon^3, N^3, \tau^3, t^3, \Phi^3, \alpha_\sigma, \alpha_\sigma, K_I^3, K_{Ie}^3\}. \quad (1)$$

Для обеспечения ресурса необходимо выполнение условия

$$R_{N,\tau,p} \leq R_{N,\tau}^c = \{N^3 / N_c, \tau^3 / \tau_c, \Phi^3 / \Phi_c\}, \quad (2)$$

где $R_{N,\tau}^c$ — критическое (предельное) значение ресурса, выражаемое через критические (разрушающие) циклы N_c , время τ_c или воздействия среды Φ_c .

Величины N^3, τ^3, N_c, τ_c , в свою очередь, зависят от параметров напряженно-деформированного состояния (НДС)

(« $\sigma^2-\varepsilon^2$ ») и предельного состояния (« $\sigma_k-\varepsilon_k$ »).

Схема прогнозирования безопасного остаточного ресурса показана на рисунке.

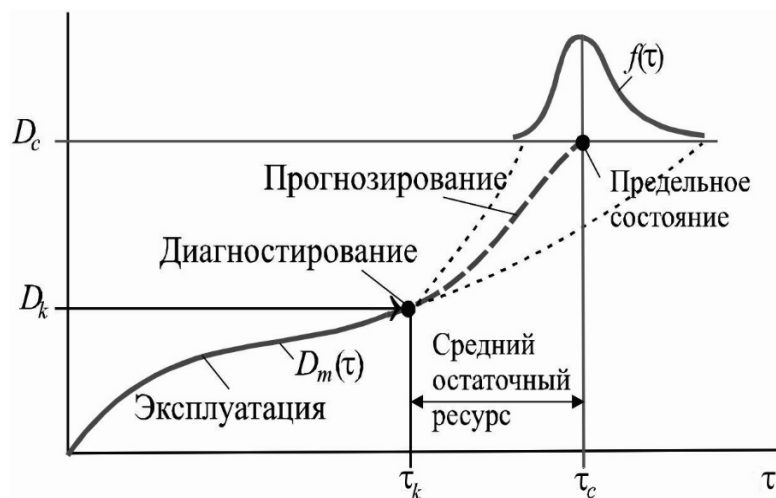


Рисунок. Схема прогнозирования безопасного остаточного ресурса конструкций и оборудования

Наиболее значимыми и важными параметрами для оценки безопасности технических объектов следует считать НДС « $\sigma^2-\varepsilon^2$ » и предельные состояния « $\sigma_k-\varepsilon_k$ », существенно влияющие на прочность, ресурс и надежность, что приводит к задаче максимально точного измерения указанных параметров средствами неразрушающего контроля и технической диагностики (НК и ТД), которые могут иметь как самостоятельные, так и взаимосвязанные цели [3].

Методология расчёта расхода ресурса (и оценки остаточного ресурса) конструкции для ответственного энергетического и трубопроводного оборудования, основанная на оценке НДС по результатам тензометрических измерений, была предложена в работах Н.А. Махутова [4; 5; 6]. Расчетная величина индивидуального расхода ресурса позволит, в свою очередь, с высокой степенью точности определить техническое состояние исследуемого объекта и произвести обоснованное планирование периодичности его контроля и ремонта с учетом темпов накопления усталостной повреждаемости. Это приведет к повышению эффективности экс-

плуатации, продлению срока службы объекта за пределы нормативного и укреплению безопасности ТЭК и НГК.

Актуальность настоящих исследований обусловлена, во-первых, значительным износом основных производственных фондов нефтегазового комплекса (60 %), а во-вторых, необходимостью определения остаточного ресурса оборудования при его дальнейшей эксплуатации за пределы нормативного срока службы, а также при планировании периодичности контроля его технического состояния и периодичности ремонтов, обеспечивающих надежность и эффективность функционирования оборудования.

В настоящее время разработаны и находятся в эксплуатации несколько систем мониторинга технического состояния оборудования тепловых и атомных электростанций (ТЭС, АЭС), а также оборудования трубопроводного транспорта (ТТ), в которых используются различные методы неразрушающего контроля, однако, эти системы предназначены для поиска уже образовавшихся дефектов и повреждений (см. таблицу).

Таблица 1. Сравнительная таблица существующих систем мониторинга технического состояния оборудования ТЭК

Наименование	Диагностика	Мониторинг	Прогнозирование	Модель прогнозирования
АВТОМАТИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ				
Вибродиагностический метод				
Система вибродиагностики <i>VIBRONET</i>	да	да	нет	нет
Тензометрический метод диагностики				
Устройства серии <i>QMBox</i> в комплекте с <i>QMLab</i>	да	да	нет	нет
Система мониторинга на базе тензостанции <i>ZET 017-T8</i> и ПО «Тензодатчик»	да	да	нет	нет
Система измерительная тензометрическая СИИТ-2	да	да	нет	нет
АИС «Ресурс»	нет	да	да	да

Анализ достоинств и недостатков существующих систем мониторинга технического состояния ответственного энергетического и трубопроводного оборудования показал, что существующие системы мониторинга используют методы и средства оценки технического состояния (диагностики) оборудования, которые дают информацию о величинах параметров и зонах их допустимого отклонения. При мониторинге появляется дополнительная информация о тенденциях изменения параметров во времени, которая может использоваться и для прогноза технического состояния и оценки остаточного ресурса оборудования.

При детальном рассмотрении существующих систем мониторинга технического состояния энергетического и трубопроводного оборудования мы пришли к выводу, что ни одна из существующих систем не решает задачи диагностики, мониторинга и прогнозирования комплексно. А большинство из методов НК и ТД могут определить только место уже существующего дефекта конструкции.

Необходимость индивидуального учёта накопленной повреждаемости и израсходованной части ресурса конструкции трубо-

проводов обусловлена важностью решения вопроса обеспечения безопасности объектов топливно-энергетического комплекса, а также индивидуальной историей нагружения.

Основываясь на научном заделе в области мониторинга технического состояния подверженных механическим нагрузкам объектов, тензометрического метода контроля и используя специализированное программное обеспечение на базе разрабатываемой в рамках настоящих прикладных научных исследований и экспериментальных разработок (ПНИЭР) методики расчета израсходованного ресурса представляется возможным создать автоматическую систему непрерывного мониторинга (АСМ) технического состояния наземных трубопроводов (водопроводов, нефтепроводов, продуктопроводов) по величине израсходованного ресурса.

Научная новизна проекта заключается в разработке системы мониторинга, обеспечивающей точность и повышенную достоверность определения состояния оборудования за счет измерения нескольких параметров с помощью высокоточных датчиков на основе моносulfида самария SmS [7], обладающего уникальными свойствами, и вновь

разработанной методики расчета индивидуального расхода ресурса трубопровода.

Тензорезистивный эффект в SmS был впервые обнаружен в 1977 г. (Каминский В.В., Голубков А.В., 1979). Первые исследования нового полупроводникового тензочувствительного материала были проведены в ФТИ им. А.Ф. Иоффе, где была разработана методика выращивания монокристаллов SmS.

Преимущества моносulfида самария:

- обладает высокой чувствительностью к деформации. КТ при $T=300$ °К достигает значений 260 (Ом/Ом)/(м/м), коэффициент пьезосопротивления всестороннего сжатия $-6 \cdot 10^{-3}$ МПа⁻¹;

- температурный коэффициент сопротивления (ТКС) SmS можно изменять в широких пределах как с помощью допирования европием или селеном, так и различными режимами испарения и осаждения, что обеспечивает получение и тензорезисторов, и терморезисторов;

- обладает линейными характеристиками, что облегчает математическую обработку результатов измерений и тарировку датчиков, и, в конечном счете, повышает точность измерений;

- является тугоплавким и термостойким материалом ($T_{пл}=2300$ °С). Это обуславливает высокую стабильность к проникающей радиации. Изменение параметров пленочных структур на основе SmS при γ -облучении до доз 10^{10} рентген не превышает 1 %, а работоспособность сохраняется при интенсивности облучения 10^6 рентген/час;

- наличие фазового перехода полупроводник—металл. Существует метод перевода напыленной поликристаллической пленки SmS в металлическое состояние, появляется возможность регулировки тензомостов без введения дополнительных регулировочных элементов.

Высокая технологичность определяется следующими свойствами моносulfида самария:

- высокая концентрация электронов проводимости ($10^{19} \div 10^{21}$ см⁻³) упрощает создание омических контактов; уменьшает переходные сопротивления между кристаллитами в поликристаллических структурах; снижает требования к чистоте материала и другим условиям выполнения технологических операций; повышает необходимое количество примесей, вводимое при допирова-

нии, что облегчает контроль, снижает чувствительность электрических параметров к наличию дефектов структуры;

- изотропность всех электрических параметров облегчает создание различных измерительных схем, не зависящих от топологии первичных преобразователей;

- термический коэффициент линейного расширения (ТКЛР) моносulfида самария имеет такую же величину, как и сталь, что не приводит к излишним температурным напряжениям на стальных упругих элементах;

- возможность формировать поликристаллические пленки моносulfида самария на любом субстрате, выдерживающем температуру 300 °С, тогда как для кремния в качестве упругого элемента используют только кремний (КНК — кремний на кремнии) или сапфир (КНС — кремний на сапфире).

Разработанные в рамках прикладных научных исследований и экспериментальных разработок (ПНИЭР) компоненты АСМ будут применимы в системах трубопроводного транспорта для автоматического мониторинга технического состояния наземных трубопроводов путем расчета израсходованного ресурса участка трубопровода по накопленным данным измеренных относительных деформаций, а по измеряемым величинам полного давления и скоростного напора потока в трубопроводе для своевременного обнаружения утечки.

Полученная с измерительных датчиков и обработанная специализированным ПО информация позволит:

- рационально планировать интервалы между техническими инспекциями, в том числе с применением методов неразрушающего контроля;

- вовремя обнаружить опасные случаи нагружения и перегрузок ответственного оборудования;

- избежать экономических и техногенных последствий на объектах топливно-энергетического комплекса

Заключение

Вопросы безопасности должны решаться на всех этапах жизненного цикла в рамках комплексного анализа и защиты объектов ТЭК и НГК от аварий и катастроф на основе как традиционных (анализ прочно-

сти, ресурса и надежности), так и новых подходов (оценка живучести, безопасности, рисков и защищенности).

Существенное значение для этого имеет максимально точная оценка НДС средствами НК и ТД, в том числе создание АСМ технического состояния исследуемого объекта по величине остаточного ресурса. Эта задача может быть успешно решена на основе создания высокочувствительных датчиков на основе моносульфида самария и модифицированной методология расчёта расхода ресурса (и оценки остаточного ресурса) конструкции для ответственного энергетического и трубопроводного оборудования. На основе измеренных компонентами АСМ величин будет определяться величина израсходованной части ресурса (в часах работы трубопровода при нормированных условиях нагружения) и остаточный ресурс.

Результаты прикладных научных исследований и экспериментальных разработок будут способствовать обеспечению повышения уровня безопасности и безаварийной работы и своевременным техническим обслуживанием ответственного энергетического и трубопроводного оборудования.

Прикладные научные исследования и экспериментальные разработки (ПНИЭР) по данной тематике выполняются при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках проведения работ по Соглашению о предоставлении субсидии № 14.582.21.0006 от 01.12.2014 г. Уникальный идентификатор ПНИЭР RFMEFI58214X0006.

Библиографический список

1. Лебедева, М. И. Аналитический обзор статистики по опасным событиям на объектах нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности / М.И. Лебедева, А.В. Богданов, Ю.Ю. Колесников // Интернет-журнал «Технологии техносферной безопасности». — 2013. — Вып. 4 (50). — Электрон. дан. — URL: <http://www.academygps.ru/img/UNK/asit/ttb/2013-4/20-04-13.ttb.pdf>.
2. Аварийность и травматизм на объектах нефтегазового комплекса. Информационный бюллетень Ростехнадзора. Спецвыпуск. — Москва : НТЦ ПБ, 2015. — 110 с.
3. Клюев, В. В. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник / В.В. Клюев. — Москва : Машиностроение, 2003. — 656 с.
4. Махутов, Н. А. Прочность и безопасность. Фундаментальные и прикладные исследования / Н.А. Махутов. — Новосибирск : Наука, 2008. — 523 с.
5. Махутов, Н. А. Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность. В 2 ч. / Н.А. Махутов. — Новосибирск : Наука, 2005. — Часть 1 : Критерии прочности и ресурса. — 494 с. Часть 2 : Обоснование ресурса и безопасности. — 610 с.
2. Махутов, Н. А. Проблемы прочности и безопасности водо-водяных энергетических реакторов / Н.А. Махутов [и др.] : под ред. Н.А. Махутова и М.М. Гаденина. — Москва : Наука, 2008. — 464 с. — (Серия «Исследование напряжений и прочности ядерных реакторов»).
3. Соловьев, С. М. Особенности электрических и термоэлектрических свойств моносульфида самария, связанные с переменной валентностью : дисс. на соискание ... канд. физ.-мат. наук. — Санкт-Петербург, 2007.

*Поступила в редакцию
22.12.15*