

ІНТЕГРУВАННЯ МЕТОДУ АЕ В ТЕХНОЛОГІЮ РЕМОНТУ І ПРОДОВЖЕННЯ РЕСУРСУ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ

А. Я. Недосека¹, С. А. Недосека¹, М. А. Яременко¹, М. А. Овсієнко¹, О. К. Савченко², С. Г. Епов²

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: inpat59@ukr.net

²АТ «Одеський припортовий завод». 65481, Одеська обл., м. Южне, вул. Заводська, 3. E-mail: office@opz.odessa.ua

Все більш актуальним стає питання оцінки поточного стану промислових об'єктів різного призначення і умов їх експлуатації, зокрема резервуарів – сховищ для зберігання нафти, зрідженого газу, рідкого аміаку та ін. Пропонується для діагностування об'єктів підвищеної небезпеки технологія АЕ моніторингу підвищеної акустичної активності в матеріалі конструкції з наступною оцінкою (класифікацією) стану об'єкту із застосуванням традиційних методів. Наведені результати аналізу даних систем АЕ моніторингу резервуарів та їх використання для визначення першочергових місць для додаткового контролю при проведенні технічних оглядів та ремонтних робіт. Бібліогр. 8, табл. 2, рис. 10.

Ключові слова: акустична емісія (АЕ), АЕ активність, АЕ моніторинг, навантаження, фактичний стан ОК

Проведення повного технічного обстеження промислових об'єктів неруйнівними методами – багатоетапний комплекс технологічних заходів: злив продукту зберігання, зачистка від залишків, зачистка всіх зварних швів і основного металу для проведення НК, зняття ізолюючого зовнішнього покриття, видалення газів і т. ін., що потребує чимало часових, людських та фінансових ресурсів. Для великогабаритних конструкцій необхідно також враховувати, що знадобиться значний час для зупинки об'єкту і виведення його з експлуатації.

Для діагностування об'єктів підвищеної небезпеки активно використовується технологія моніторингу підвищеної акустичної активності в матеріалі конструкції, що базується на методі акустичної емісії (АЕ) [1], з подальшою оцінкою стану об'єкта із застосуванням традиційних методів (підходів). Використання стаціонарних систем моніторингу надає можливість здійснювати експлуатацію виробничих об'єктів, виходячи з їх реального технічного стану. Результати враховуються при проведенні експертного обстеження та призначення допустимого терміну експлуатації до наступного експертного обстеження. Це дозволяє виключити технічно невиправдані зупинки виробництва і раціонально планувати проведення ремонтно-профілактичних робіт [2].

Розглянемо більш детально основні задачі, що вирішуються із застосуванням даної технології на промислових об'єктах, та отримані результати [3].

Обладнання для проведення АЕ моніторингу, а саме датчики АЕ; коаксіальні кабелі для забезпечення зв'язку датчиків з приладом; кабель зв'язку з керуючим комп'ютером встановлюються на об'єкті під час проведення поточного або капітального ремонту зі зняттям, при наявності,

захисних покриттів. На цьому ж етапі, після вивчення технічної документації, особливостей експлуатації об'єкту, результатів проведення попередніх обстежень і, можливо, проведення ремонтних робіт, виконуються і дослідно-експериментальні роботи на об'єкті з метою визначення його акустичних властивостей, місць і кількості датчиків для забезпечення можливості отримання повноцінної інформації з усього контрольованого об'єкту протягом тривалого періоду. Для об'єктів, що працюють в умовах високих температур, додаткового розраховуються параметри хвилеводів та технологія їх фіксації на поверхні об'єкту.

Система моніторингу ЕМА має в складі обладнання та спеціалізоване програмне забезпечення (ПЗ) виробництва ІЕЗ ім. Є.О. Патона. Окрім програм, якими контролюється власне робота вимірювального обладнання, ПЗ включає додатковий комплекс аналітичних та сервісних програм. За період експлуатації ПЗ ЕМА неодноразово модернізувалося. Фахівці ІЕЗ ім. Є.О. Патона мають цілодобовий доступ до даних АЕ моніторингу об'єктів з використанням мережі Інтернет як у режимі перегляду інформації АЕ, що надходить з резервуарів, так і в режимі управління для внесення і, за необхідності, коригування вихідних даних, перевірки працездатності різних режимів роботи ПЗ та обладнання або установки оновлених версій ПЗ з повідомленням фахівців підприємства.

Головні з розв'язуваних системою безперервного АЕ моніторингу ЕМА завдань [4]:

– обробка в режимі реального часу даних про сигнали АЕ та інших експлуатаційних технологічних даних, отриманих з об'єкта, наприклад, таких, як тиск, температура, рівень наливу, деформація конструктивних елементів об'єкту;

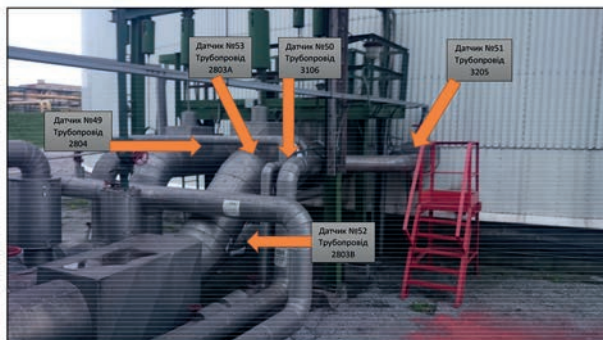
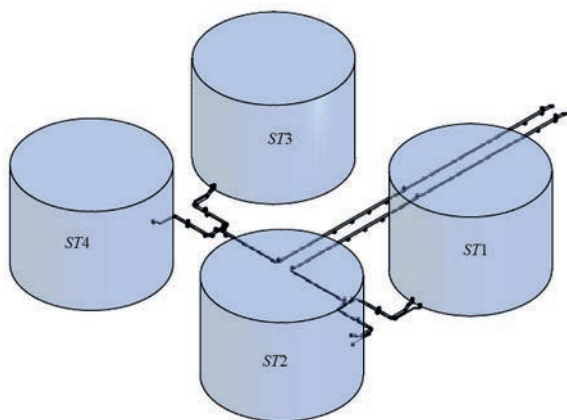


Рис. 1. Об'єкти безперервного АЕ моніторингу

- видача індикаторного попередження трьох рівнів при виникненні небезпечної акустичної активності;
- розрахунок при виникненні небезпечної акустичної активності рівня руйнівних навантажень;
- обробка та подання у графічному і табличному вигляді статистики виданих попереджень із зазначенням місць підвищеної АЕ активності;
- при застосуванні спеціального ПЗ надання, у разі виникнення небезпеки, колірного і звукового попередження, автоматична генерація нормованої інтелектуальної поради щодо дій оператора.

До основних переваг режиму безперервного моніторингу слід віднести те, що спостереження не вимагає зміни робочих параметрів і спеціального навантаження конструкції, спрощується процедура контролю. Робота без перевантажень, необхідних при звичайних випробуваннях, подовжує термін служби конструкції.

Розглянемо результати роботи систем безперервного АЕ моніторингу ЕМА на резервуарах (РВС) на одному з підприємств хімічної промисловості [5]. На 4-х резервуарах встановлені системи сімейства ЕМА – ЕМА-3 і ЕМА-4. Об'єкти контролю – циліндричні зварні резервуари з кришкою, що мають такі параметри: об'єм 34000 м³; робоче середовище – рідкий аміак; робоча температура – -34 °С; марка матеріалу – ASTM-A537.S1; A537.A; діаметр 52 м; висота 21 м; поверхня контролю 3,5 тис. м²; дата введення в експлуатацію – 1978 р. Системи отримують дані як з резервуарів, так і з трубопроводів наливу-зливу продукту (рис. 1).

На циліндричній поверхні резервуару встановлено 48 давачів АЕ (ДАЕ). ДАЕ розташовані у 3-х горизонтальних перетинах (рівнях) на відстані 7 м один від одного (по 16 ДАЕ у кожному перетині на відстані 10,23 м один від одного). Схема розміщення датчиків АЕ на поверхні об'єктів наведена на рис. 2. Додатково показані давачі 49-56, що

контролюють вхідні трубопроводи у режимі зонної локації.

В процесі проведення АЕ моніторингу персонал, відповідальний за даний об'єкт, отримує оперативну інформацію щодо стану матеріалу та найбільш небезпечні місця на поверхні об'єкту. Це показує спеціальний індикатор прогнозу руйнівного навантаження і попередження про небезпеку на робочому екрані програми (рис. 3). При нормальному стані металу стінки конструкції індикатор має зелений колір, прогноз руйнівного навантаження відсутній. Якщо в процесі вимірювання з'являється підвищена акустична активність, індикатор змінює колір відповідно до рівня попередження: 1 попередження – жовтий колір, 2 попередження – помаранчевий колір, 3 попередження – червоний колір. При прогнозуванні системою руйнівного навантаження на індикатор виводиться значення прогнозу (представлено нижнім і верхнім значеннями в діапазоні похиб-

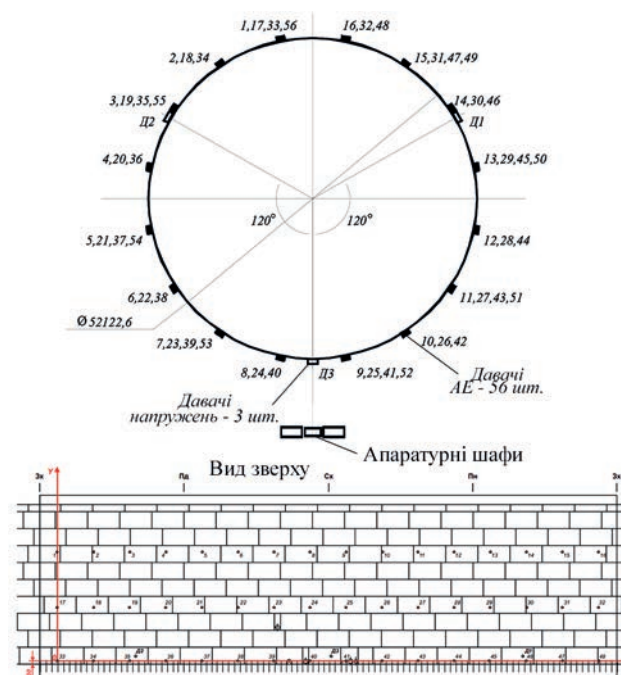


Рис. 2. Схема розміщення датчиків АЕ на об'єкті (приклад)

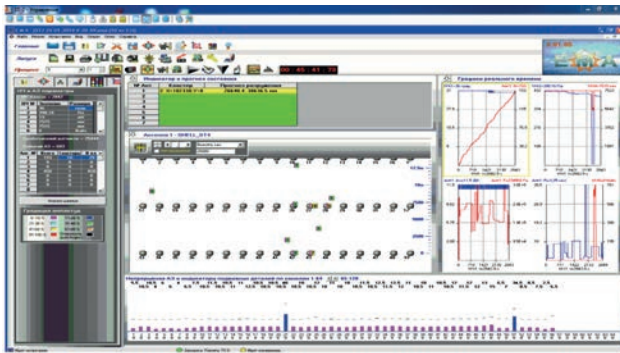


Рис. 3. Робочий екран програми моніторингу з наданням попередження 1 рівня (жовта полоса) та прогнозу рівня навантаження

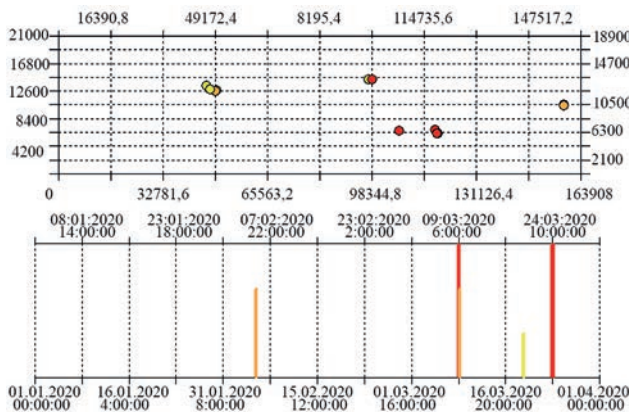


Рис. 4. Статистична інформація щодо розподілу кластерів подій АЕ, для яких видавались попередження про небезпеку, на бічній поверхні резервуару за 1 квартал 2020 р.

ки не більше $\pm 15\%$) і координати джерела сигналів АЕ. Наявність такої інформації дозволяє оперативно прийняти рішення щодо фактичного стану матеріалу об'єкту та можливих коригувань у режимі його експлуатації (наприклад, змінити рівень навантаження). В автоматичному режи-

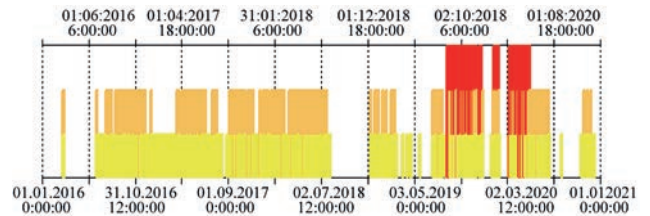


Рис. 5. Загальна картина розподілу у часі для попереджень 1–3 рівнів за період 2016–2020 рр.

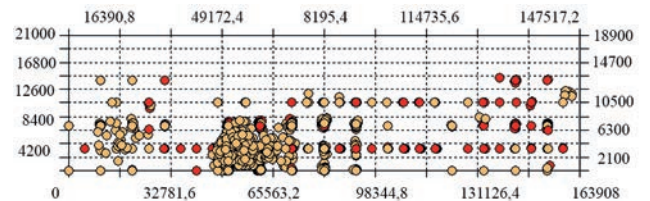
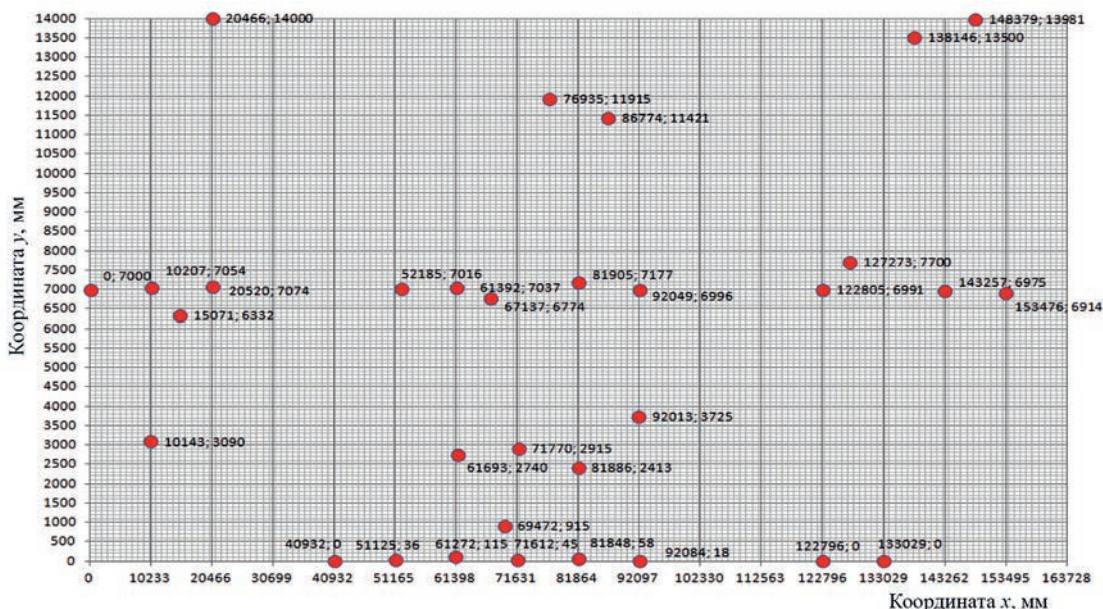


Рис. 6. Загальна картина розподілу джерел АЕ на поверхні РВС за період 2016–2020 рр.

мі оператора також видається порада щодо його можливих дій у цій ситуації [4].

Зібрана та оброблена статистична інформація дозволяє при проведенні планових ремонтів надати інформацію щодо координат джерел АЕ, для яких видавались попередження вище 1-го рівня небезпеки, для скорочення строків проведення відновлювальних робіт. Координати джерел АЕ виводяться як у табличному вигляді, так і з прив'язкою до поверхні об'єкту АЕ моніторингу.

При обробці результатів АЕ моніторингу резервуарів за будь-який період спостереження на розгортці бокової поверхні резервуарів наводяться координати місць підвищеної АЕ активності, для яких видавались системою попередження різних рівнів небезпеки (рис. 4). Цей період може бути довільним з часу встановлення відповідного ПЗ: роки, місяці, дні і години, тобто



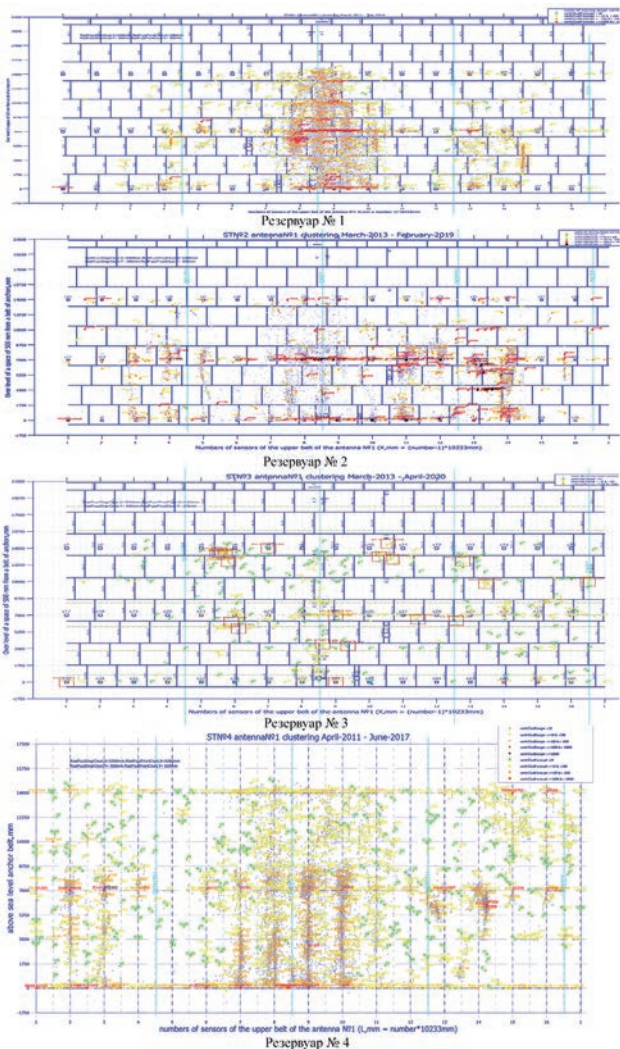


Рис. 8. Розподіл кластерів АЕ подій, для яких видавались попередження про небезпеку і прогнози руйнування, на розгортці обичайки резервуарів (сумарні дані за період 8 років спостереження)

будь-який період часу в процесі експлуатації. З урахуванням того, що крім акустичної інформації також записуються і технологічні параметри (рівень навантаження, вібраційні характеристики, напруження та ін.), це дає уявлення щодо процесів, що відбуваються у матеріалі конструкцій, і дозволяє контролювати режими експлуатації об'єктів. Результати АЕ моніторингу за ви-

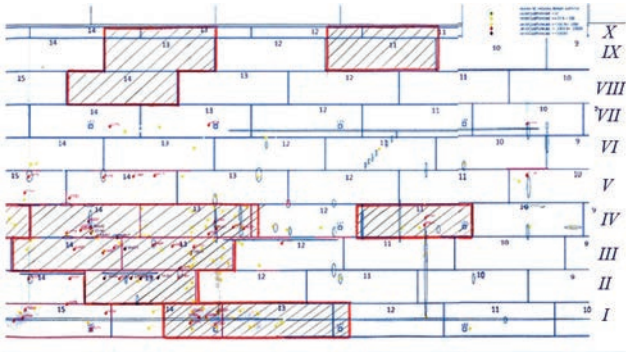


Рис. 9. Зони для проведення ДК при проведенні капітального ремонту

Таблиця 1. Координати місць підвищеної активності для проведення першочергового контролю об'єкту (радіус кластеризації – 1500 мм)

Номер з/п	X, мм	Y, мм
1	81937	7050
2	81776	91
3	61363	43
4	71610	40
5	20466	7057
6	92140	6970
7	51086	66
8	61362	7074
9	51134	7123
10	122796	7000
11	86774	11421
12	20466	14000
13	131750	8400

Таблиця 2. Місця для проведення додаткового контролю неруйнівними методами

Номер поясу	Номери листів
I	5, 6, 1, 13, 14
II	3, 4, 18, 13
III	5, 1, 2, 13, 14
IV	5, 18, 1, 13, 14, 15, 16, 11
V	4, 5
VI	3, 4, 5
VII	
VIII	4, 5, 14
IX	4, 5, 11, 13
X	4, 5, 11, 13

браний період часу автоматично оформлюються у вигляді протоколу згідно з вимогами нормативної документації (НД).

Для обробки даних, отриманих у режимі моніторингу, на основі XML технології створені спеціальні аналітичні програми, що дозволяють оцінити стан об'єкта контролю протягом тривалого часу. Вони дозволяють простежити зміну основних параметрів об'єкта в процесі тривалої експлуатації, оцінити найбільш небезпечні ділянки і сформувати довгостроковий прогноз на майбутнє. Збереження статистики у форматі XML дозволяє вести стандартизований обмін даними XML через Інтернет, переглядати та аналізувати їх.

Перед проведенням капітального ремонту резервуарів було проаналізовано результати АЕ моніторингу за декілька років спостереження, які вибірково представлені на рис. 5, 6.

З огляду на те, що системи безперервного моніторингу працюють тривалий час, періодично генеруючи попередження про небезпеку, актуальним є вивчення тенденцій виникнення небезпечних ситуацій [6]. Це дозволяє зіставити генерацію певного попередження або їх групи з технологічними процесами, параметрами навантаження, кліматичними умовами і т.п.

Зафіксована на поточний період АЕ активність є періодичною, що свідчить про повільний поступовий розвиток пошкодженості в різних частинах резервуарів, який відбувається періодично, відповідно до умов навантаження, що постійно змінюються. Узагальнений аналіз показників АЕ параметрів та індикаторів безпеки дозволяють стверджувати, що на даний момент накопичені пошкодження не досягли критичного характеру, який би становив суттєву загрозу для матеріалу корпусів резервуарів.

Тим не менш, слід відзначити періодичне виникнення ситуацій, коли генерувалися попередження 2-3 рівнів небезпеки. Оскільки дані попередження після їх генерації не мали продовження протягом наступного часу вимірів, їх виникнення не потребувало втручання у технологічний процес та зменшення рівня наливів.

Важливим є вивчення статистичної інформації щодо ділянок об'єктів контролю, на яких зареєстрована значна акустична активність (рис. 7).

Проведений аналіз отриманих даних АЕ моніторингу за тривалий період спостереження дозволив скласти детальні карти об'єктів АЕ моніторингу із зазначенням місць, що повинні бути перевірені іншими методами неруйнівного контролю при проведенні капітального ремонту (рис. 8). Координати цих місць також надаються у вигляді таблиць з прив'язкою до координатної сітки або, що є більш інформативним, прив'язуються до виробничих креслень об'єктів (табл. 1, 2). Слід зазначити, що ПЗ систем сімейства ЕМА дозволяє проводити обробку отриманої інформації як з використанням стандартних пакетів, так і створювати інші додаткові варіанти обробки і представлення інформації.

Нижче наведені узагальнені дані щодо місць виникнення підвищеної АЕ активності для чотирьох резервуарів за тривалий період спостереження (рис. 8).

На рис. 9 показані окремі рекомендовані для проведення додаткового контролю (ДК) місця.

На підставі виданих рекомендацій за даними АЕ моніторингу проведено ДК резервуару (вибіркові результати наведені на рис. 10).

Підвищення інформативності безперервного АЕ моніторингу досягається низкою органі-

заційних, апаратних і програмних засобів, до яких відносяться: поступовий перехід до використання приладів новішого покоління (наприклад, заміна систем ЕМА-3 системами ЕМА-4); удосконалення та розширення можливостей ПЗ безперервного АЕ моніторингу; принципова можливість розширення числа вимірюваних АЕ і технологічних каналів, що реалізується апаратним і програмним способами; розширення можливостей аналізу отриманих даних; розширення засобів візуального відображення об'єкта і результатів моніторингу; включення програмних засобів статистичного аналізу попереджень про небезпеку і місць виникнення підвищеної АЕ активності за обраний період.

Таким чином, системи АЕ моніторингу промислових об'єктів дозволяють оцінювати поточний технічний стан об'єктів в реальному часі з класифікацією зон підвищеної АЕ активності відповідно до вимог НД [7, 8] і вбудованого алгоритму оцінки з наданням та подальшою обробкою відповідного попередження про небезпеку, що, в свою чергу, дозволяє значно скоротити час і ресурси при проведенні ремонтних робіт. Результати АЕ моніторингу враховуються при оцінці терміну і режимів подальшої експлуатації промислових об'єктів, що підвищує надійність їх експлуатації і оптимізує режими експлуатації.

Висновки

Системи АЕ моніторингу резервуарів дозволяють оцінювати поточний технічний стан об'єктів в реальному часі з класифікацією зон підвищеної АЕ активності відповідно до вимог НД і вбудованого алгоритму оцінки з наданням відповідного попередження про небезпеку.

Проведення АЕ моніторингу небезпечних об'єктів дозволило скоротити час і ресурси при проведенні експертного обстеження і ремонтних робіт.

Результати АЕ моніторингу враховуються уповноваженою експертною організацією при оцінці терміну і режимів подальшої експлуатації об'єктів АЕ моніторингу.

Список літератури

1. Недосека А.Я., Недосека С.А. (2020) *Основы расчета и диагностики сварных конструкций: монография*. 5-е изд., перераб. и доп. Патон Б.Е. (ред.). Киев, Индпром.
2. Шаталов А.А., Разуваев И.В., Костюков В.Н. (2003) Опыт реализации стратегии обеспечения безопасности нефтехимических производств при их эксплуатации по фактическому техническому состоянию. *Химическая техника*, 3, 11–13.
3. ASTM E 1139-07 *Standard Practice for Continuous Monitoring of Acoustic Emission from Metal Pressure Boundaries*.
4. (2017) *Технічна діагностика матеріалів і конструкцій: довідковий посіб.* У 8 т. Назарчук З.Т. (ред.). Т.5: Акустичні методи контролю деградації матеріалів і дефектності елементів конструкцій. Львів, Простір-М.
5. Недосека А.Я., Недосека С.А., Яременко М.А. и др. (2014) Об управлении безопасностью эксплуатации оборудования, несущего рабочую нагрузку. *Непрерывный*

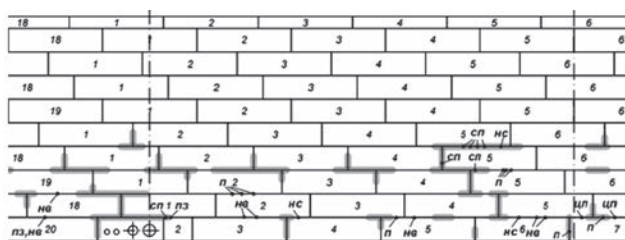


Рис. 10. Результати ДК РВС (фрагмент): *n* – пора; *сп* – скупчення пор; *цп* – ланцюжок пор; *пз* – підріз; *нс* – несплавлення; *нв* – наплив

- акустико-эmissionsный мониторинг. *Хімічна промисловість України*, 1, 10–21.
- Патон Б.Е., Лобанов Л.М., Недосека А.Я. и др. (2016) Интеллектуальные технологии в оценке состояния конструкций (АЭ технология и контролирующая аппаратура нового поколения на ее основе). *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 2, 3–18.
 - (2003) ДСТУ 4227-2003 *Настанови щодо проведення акустико-емісійного діагностування об'єктів підвищеної небезпеки*. Держстандарт України.
 - (2012) СОУ 50.10–2012 *Настанови щодо проектування та впровадження систем акустико-емісійного контролю, діагностування та моніторингу об'єктів підвищеної небезпеки*. Київ, ТК-78 «ТДНК».
 - chemical productions in their operation by actual technical state. *Khimicheskaya Tekhnika*, 3, 11–13 [in Russian].
 - ASTM E 1139-07 Standard Practice for Continuous Monitoring of Acoustic Emission from Metal Pressure Boundaries.
 - (2017) *Technical diagnostics of materials and structures: Refer. book. In: 8 vol. Ed. by Z.T. Nazarchuk. Vol.5: Acoustic methods of control of material degradation and defectiveness of structural elements*. Lviv, Prostir [in Ukrainian].
 - Nedoseka, A.Ya., Nedoseka, S.A., Yaremenko, M.A. et al. (2014) On control of safe operation of equipment under working load. Continuous acoustic emission monitoring. *Khimichna Promyslovist Ukrainy*, 1, 10–21 [in Russian].
 - Paton, B.E., Lobanov, L.M., Nedoseka, A.Ya. et al. (2016) Smart technologies for evaluation of structure state (AE technologies and new generation control equipment on its basis). *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, 2, 3–18 [in Russian].
 - (2003) DSTU 4227-2003: *Guidelines on conducting acoustic emission diagnostics of higher hazard facilities*. Derzhstandart Ukrainy [in Ukrainian].
 - (2012) SOU 50.10–2012: *Recommendations on design and implementation of acoustic emission systems of control, diagnostics and monitoring of higher risk facilities*. Kyiv, TK-78 TDNK [in Ukrainian].

References

INTEGRATION OF AE METHOD INTO THE TECHNOLOGY OF REPAIR AND EXTENSION OF LIFE OF METAL STRUCTURES

A.Ya. Nedoseka¹, S.A. Nedoseka¹, M.A. Yaremenko¹, M.A. Ovsienko¹, O.K. Savchenko², S.G. Epov²

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU, 11 Kazymyr Malevych str., 03150, Kyiv, E-mail: office@paton.kiev.ua

²PJSC «Odessa Port Plant». 3 Zavodskaya str., 65481, Yuzhne, Odessa reg. E-mail: office@opz.odessa.ua

The issue of evaluation of the current state of various-purpose industrial facilities and operating conditions, in particular tanks – storages for oil, liquefied gas, liquid ammonia, etc., is becoming ever more urgent. It is proposed to apply for diagnostics of critical facilities the AE technology of monitoring higher acoustic activity in the structure material with subsequent assessment (classification) of the state of the facility using the traditional methods. The paper gives the results of analysis of the data of AE systems for monitoring the tanks and their application for determination of priority areas for additional control during performance of engineering inspection and repair operations. Ref. 8. Tabl. 2, Fig. 10.

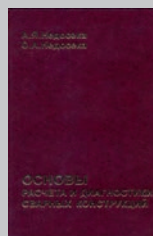
Key words: *acoustic emission (AE), AE activity, AE monitoring, loading, actual state of tested facility*

Надійшла до редакції 03.02.2021

Нові книги

Недосека А.Я., Недосека С.А. **Основы расчета и диагностики сварных конструкций**. Киев: ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины, – 2020. – 886 с.

Изложены основные проблемы, связанные с обеспечением безопасности эксплуатации конструкций и сооружений, возникающие при расчете их прочности, при испытаниях и в процессе эксплуатации. Большое внимание уделено теории, методам и средствам диагностики и оценки состояния материала конструкций, его остаточному ресурсу. Изложены основные вопросы теории прогнозирования и принятия решений при оценке состояния конструкций. Освещены современные методы расчета и измерения температурных полей, напряжений и деформаций, показаны способы борьбы с вредными последствиями сварочных напряжений и деформаций, рассмотрены основы классической и квантовой механики разрушения. Предназначена для студентов, аспирантов и преподавателей машиностроительных специальностей вузов, для специалистов, проходящих переподготовку на курсах повышения квалификации по направлению «Техническая диагностика», а также для инженеров предприятий и организаций, занимающихся контролем и диагностикой конструкций.



Мордюк Б.М., Прокопенко Г.І., Волошко С.М., Соловей С.О., Клочков І.М., Линник Г.О., Красовський Т.А., Високолян М.В. / Под ред. Г.І. Прокопенка. **Ультрозвукова ударна обробка конструкцій і споруд транспортного машинобудування**. Київ: ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, – 2020. – 310 с. У монографії узагальнено результати багаторічних експериментальних досліджень фізичних основ ультразвукової ударної обробки (УЗУО) поверхні конструкційних матеріалів переважно на основі заліза та алюмінію, а також практичного використання цієї технології для зміцнення зварних з'єднань різноманітних конструкцій і споруд на підприємствах вагонобудівної та інших галузей промисловості України. Досліджено структурно-фазові перетворення у поверхневих шарах сталей та алюмінієвих сплавів під час УЗУО; обґрунтовано ефективність застосування УЗУО для підвищення циклічної довговічності зварних з'єднань конструкцій і споруд, які експлуатуються в умовах циклічного навантаження і дії навколишнього середовища. Для наукових та інженерно-технічних працівників, які займаються дослідженнями, проектуванням, виготовленням і експлуатацією виробів, конструкцій і споруд, які піддаються дії періодичних або випадкових динамічних навантажень та призводять до деградації матеріалу і втомного руйнування. Може бути корисною для аспірантів і студентів ЗВО будівного та машинобудівного профілю.

