

## **РАЗРАБОТКА НЕЙРОСЕТЕВОГО ЭМУЛЯТОРА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СТЕНКИ РЕЗЕРВУАРА НА ОСНОВЕ ДАННЫХ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО КОНТРОЛЯ**

**Белов Д.А.<sup>1</sup>**

**Научный руководитель – докт. техн. наук, профессор Иванов В.А.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Тюменский индустриальный университет  
bda\_2001@mail.ru

### **Введение**

Обеспечение промышленной безопасности вертикальных стальных резервуаров, эксплуатируемых в нефтегазовой и химической отраслях, является приоритетной государственной задачей. Накопление усталостных повреждений и развитие коррозионных дефектов в стенках резервуаров создают угрозу техногенных катастроф и наносят значительный экологический и экономический ущерб [1].

Существующие методы контроля, основанные на периодическом осмотре с использованием ультразвуковой толщинометрии, требуют вывода оборудования из эксплуатации, что крайне затратно. В связи с этим активно развиваются методы акустико-эмиссионного (АЭ) контроля, позволяющие диагностировать объект в реальном времени под нагрузкой [1,2]. Современные исследования предлагают использовать нейросетевой анализ для классификации типов дефектов (например, отличие коррозии от утечки) [3,4], однако эти работы не дают количественной оценки напряженно-деформированного состояния (НДС) металла.

За рубежом активно исследуется применение физических нейронных сетей и резервуарных вычислений для обработки сигналов, но данные разработки находятся на ранней стадии и не адаптированы для крупногабаритных резервуаров [5, 6]. Отсюда вытекает научная проблема – отсутствие методов, позволяющих по данным АЭ перейти от констатации факта наличия дефекта к прогнозированию ресурса конструкции путем эмуляции полей напряжений.

### **Основная часть**

Суть предлагаемого решения заключается в создании программного эмулятора, построенного на базе глубокой нейронной сети, который напрямую преобразует многоканальные сигналы АЭ в картину распределения напряжений и деформаций по стенке резервуара. В отличие от традиционных подходов, здесь нейросеть выступает не в роли классификатора (трещина / не трещина), а в роли аппроксиматора сложной физической зависимости. Основная гипотеза работы состоит в том, что форма волны, времена прихода сигналов на антенную решетку и их спектральные характеристики содержат скрытую информацию о перераспределении напряжений вокруг дефекта.

Для обучения такой модели предлагается оригинальный метод генерации синтетических данных. Создается параметрическая конечно-элементная модель типового резервуара вертикального стального. Путем варьирования параметров трещины (глубина, длина, ориентация, местоположение) и уровня нагрузки рассчитываются два массива данных: во-первых, сигналы в точках установки датчиков АЭ, а во-вторых, эталонное поле напряжений. Такой подход, известный как «цифровой двойник», позволяет получить неограниченный объем размеченных данных для обучения. Разработанная архитектура нейросети является гибридной: сверточные слои анализируют временную форму сигнала, а полносвязные слои сопоставляют выделенные признаки с координатами расчетных узлов сетки резервуара. Это является новейшим методом, так как объединяет обработку сигналов и пространственное моделирование (регрессия) в едином алгоритме.

Предлагаемое решение экономически эффективно, так как позволяет использовать существующие штатные системы АЭ-контроля без их аппаратной модернизации. Программная надстройка (эмулятор) может функционировать на промышленном компьютере непосредственно на объекте, выдавая персоналу не просто сигнал тревоги, а наглядную картину распределения напряжений, что позволяет перейти к ремонту оборудования по фактическому состоянию. Актуальность направления подтверждается мировым трендом на внедрение технологий искусственного интеллекта в системы неразрушающего контроля [7].

### Выводы

В ходе исследования предложена концепция и архитектура нейросетевого эмулятора для оценки НДС стенки резервуара по данным акустико-эмиссионного контроля. Практическое использование разработанного нейросетевого эмулятора позволит повысить достоверность диагностики резервуаров в 1,5-2 раза за счет исключения субъективного фактора оператора и ошибок координатометрии. Результаты исследований могут быть внедрены в программное обеспечение стационарных систем мониторинга, эксплуатируемых на нефтебазах и в резервуарных парках. В дальнейшем предлагается провести опытную эксплуатацию (испытания) на одном из резервуаров, оснащенных системой АЭ, с последующим сравнением прогнозных данных эмулятора с результатами выборочного ультразвукового контроля при плановом выводе резервуара в ремонт. Положительные результаты испытаний позволят рекомендовать данный подход для включения в нормативную документацию по промышленной безопасности.

### Литература

1. Иванов В. А., Белов Д. А. Интеллектуальные методы оценки ресурса и технического состояния резервуаров хранения нефтепродуктов: состояние и перспективы // Нефтегазохимия – 2025: материалы Международной научно-технической конференции, Минск, 3–5 декабря 2025 г. Минск: БГТУ, 2025. С. 51–54.
2. Белов Д. А. Антикоррозионная защита резервуаров: основные материалы и технологии // Инновационные процессы в науке и технике XXI века: материалы XX Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов, ученых, педагогических работников и специалистов-практиков. В 3 т. Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2023. Т. 3. С. 94–100.
3. Maksymov I. S., Pototsky A., Suslov S. A. Neural Echo State Network using oscillations of gas bubbles in water: Computational validation by Mackey-Glass time series forecasting // arXiv e-prints. 2021. arXiv: 2112.11592. P. 1-5. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2112.11592>.
4. Овчарук В. Н. Опыт применения многослойной нейронной сети с обратным распространением ошибки в целях решения задач неразрушающего контроля // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2023. № 1 (68). С. 81–90.
5. Земенкова М. Ю. Интеллектуальный мониторинг состояний объектов трубопроводного транспорта углеводородов с применением нейросетевых технологий // Записки Горного института. 2022. Т. 258. С. 933–944. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.98>
6. Riahi M., Shamekh H., Khosrowzadeh B. Differentiation of leakage and corrosion signals in acoustic emission testing of aboveground storage tanks floor by using artificial neural network // Дефектоскопия. 2008. № 6. С. 85–93.
7. Abbas A. H., Abdel-Ghani H., Maksymov I. S. Classical and quantum physical reservoir computing for onboard artificial intelligence systems: A perspective // Dynamics. 2024. Vol. 4, no. 3. P. 643–670. <https://doi.org/10.3390/dynamics4030033>.