

ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РЕАЛИЗАЦИИ ИНДУСТРИАЛЬНОЙ РЕВОЛЮЦИИ 4.0 В ПРОДУКЦИИ «НПЦ «ЭХО+»



А. Е. Базулин,
канд. техн. наук,
гл. конструктор



Е. Г. Базулин,
д-р техн. наук,
зам. ген. директора
по науч. вопросам,
нач. системного отдела



Д. С. Тихонов,
канд. техн. наук,
зам. ген. директора

Рассматриваются примеры применения современных технологий, относящихся к индустриальной революции 4.0 в ультразвуковом контроле, реализованные или запланированные к реализации в продукции ООО «НПЦ «ЭХО+».

В журнале «В мире НК» в 2018 году вышла статья Тейера Питера «Неизбежность четвертой промышленной революции и роль НК и мониторинга». Статья переведена и перепечатана из журнала Insight (сентябрь 2017 года) [1]. В статье анализируются итоги прогнозов касательно тенденций развития технологий неразрушающего контроля, сделанные пять лет назад (в целом сбываются), и представлены прогнозы на следующие 5, 10 и 20 лет.

Рассмотрим основные направления, по которым развивается продукция ООО «НПЦ «ЭХО+» в приложении к индустриальной революции 4.0 в ультразвуковом контроле. Среди таких технологий:

- 1) беспроводные технологии:
 - а) удаленное управление системой сбора данных;
 - б) передача данных в «облако» и расшифровка экспертом или автоматическим алгоритмом;
- 2) роботизация и автоматизация:
 - а) автоматизация настройки и проведения контроля, самодиагностика аппаратуры;
 - б) автоматизация анализа данных (в том числе с применением технологий машинного обучения) при определении типа дефектов и качества собран-

ных данных для различных технологий контроля (ФР, ЦФА, TOFD);

с) создание «цифровых двойников» и интеграция данных УЗК и УЗТ в систему управления жизненным циклом предприятия;

3) учет параметров объекта контроля:

а) снижение влияния параметров поверхности;

б) учет профиля наружной поверхности, интеграция с автоматизированным визуальным контролем;

с) учет профиля внутренней поверхности;

д) учет анизотропии объекта контроля;

4) продвинутое моделирование процесса ультразвукового контроля.

Беспроводные технологии и базы данных

Среди прочих примеров использования беспроводных технологий, таких как объединение всевозможных датчиков и встраивания их в АСУ ТП предприятия, в системах и дефектоскопах серии «АВГУР» реализованы следующие возможности:

- привязка места контроля к данным контроля по координатам GPS/GLONASS;

- удаленное подключение эксперта к системе или дефектоскопу для конфигурирования;

- передача собранных данных контроля в «облачное» хранилище для оперативной расшифровки квалифицированным оператором.

Объединение нескольких методов и технологий контроля позволяет приблизить задачу построения цифрового двойника опасного промышленного объекта для принятия решения об объемах диагностики и остаточном ресурсе. Мы в «ЭХО+» еще в начале 2000-х прочувствовали, к чему все идет, и сразу строили нашу систему «АВГУР» вокруг базы данных, которая включает в себя сведения об объекте контроля, методиках, настройках, данных контроля, нормах оценки качества и результатах анализа данных (рис. 1). Пример роста объема базы данных на сервере ООО «НПЦ «ЭХО+» показан на

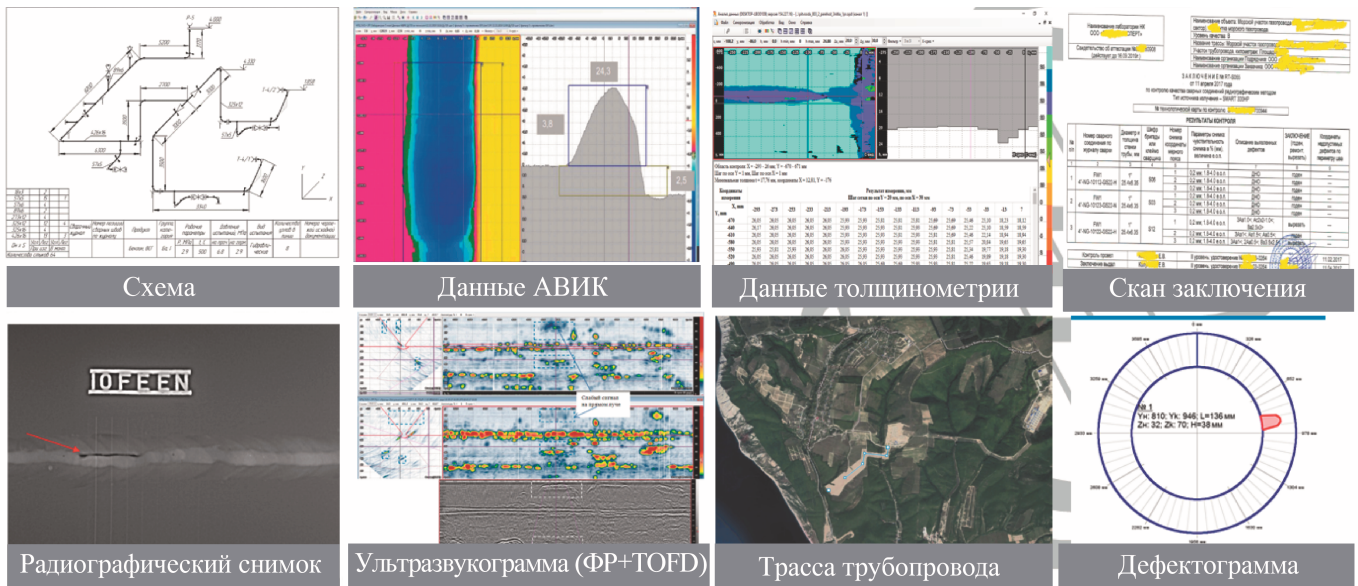


Рис. 1. Принцип построения общей базы данных результатов контроля

Объем данных в базе данных «АВГУР», Гб

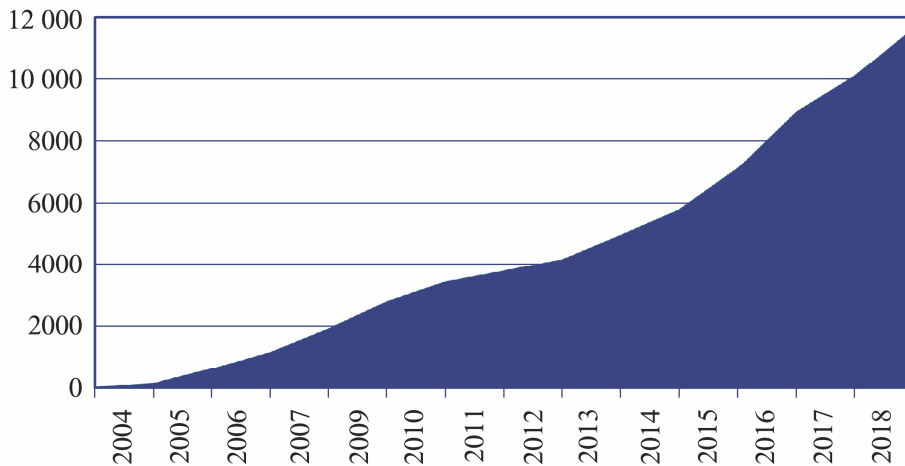
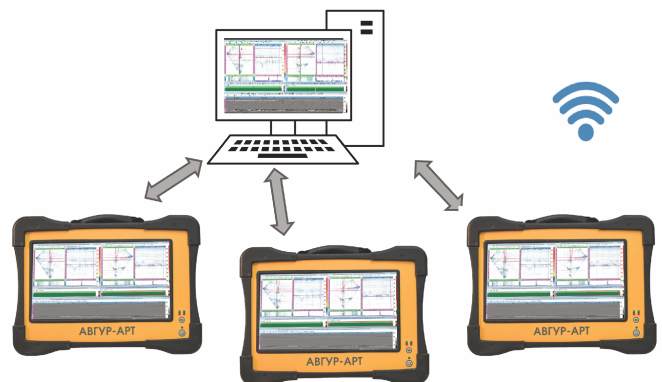


Рис. 2. Объем данных, хранящихся в базе данных «АВГУР» на сервере ООО «НПЦ «ЭХО+»

рис. 2. Полученная база данных, переданная заказчику – эксплуатирующей организации, позволяет проверить целостность данных, провести мониторинг состояния ответственных узлов и в объединении с системой, реализующей методологию Risk Based Inspection [2], планировать проведение диагностики и ремонтов.

К централизованной базе данных организован доступ со множества терминалов (рис 3). Таким образом обеспечивается разделение ответственности между пользователями:

- специалист III уровня готовит настройку прибора в соответствии с утвержденной методикой или технологической картой;
- специалист II или I уровня загружает настройку в прибор, выполняет калибровку чувствительности, сбор данных на объекте и прочие



Передача настроек на системы и дефектоскопы

Рис. 3. Принцип обмена данными между сервером и портативными дефектоскопами

операции по контролю. Загружает результаты калибровки и контроля в базу данных;

- специалист III или II уровня выполняет расшифровку данных и может дать обратную связь по качеству собранных данных (ре-скан), необходимости перекалибровки или ремонта;

- в случае необходимости специалист III уровня может подключиться к рабочему столу пользователя и проверить корректность работы, а также оказать консультацию прямо во время осуществления контроля.

Автоматизация и роботизация

Роботизированный и автоматизированный контроль находит все большее распространение в практике (рис. 4). Применяются и устройства для дистанционного контроля тех объектов, к которым осложнен или невозможен прямой доступ (ядерные реакторы, внутренняя часть трубопроводов, не подверженных внутритрубной диагностике, сварные

швы и основной металл емкостей), роботизированная рука с шестью степенями свободы, планшетные сканеры, относительно простые двухкоординатные сканеры для сварных швов, пилотируемые и автономные дроны. Главное назначение такой автоматизации – обеспечение воспроизводимости и документирования результатов контроля, снижение влияния субъективного фактора, а в ряде случаев и принципиальное повышение скорости контроля.

Все поколения дефектоскопов «АВГУР» были созданы с прицелом на автоматизированный контроль с визуализацией и архивацией данных ультразвукового контроля.

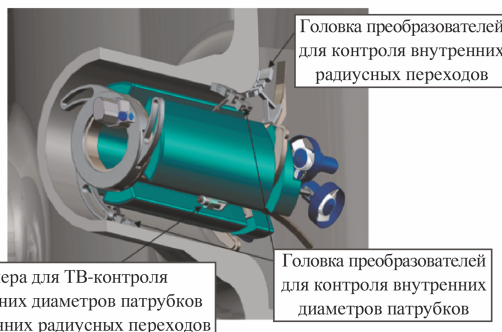
Самодиагностика и автоматизация анализа данных

Проверка работоспособности по модулям

Каждый модуль, входящий в состав системы (модули управления сканерами, модули ультразвуковые, модули автоматизированного ВИК), проходит



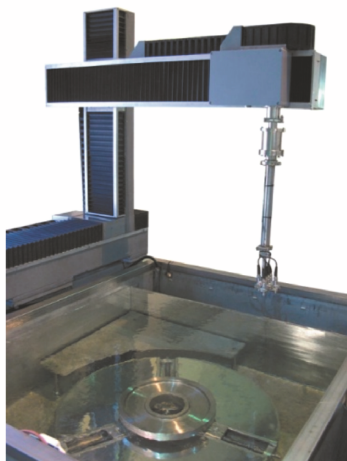
Робот для обследования трубопроводов (АКС)



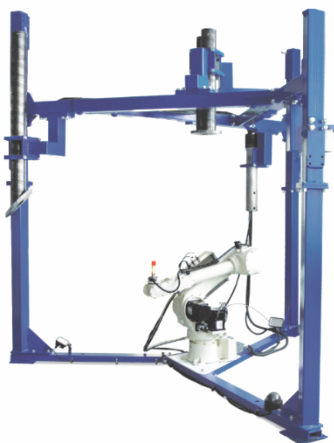
"Подводная лодка" для обследования патрубков реакторов (DEKRA)



Двухкоординатный сканер для сварных швов ("ЭХО+")



Планшетный сканер ("КРОПУС")

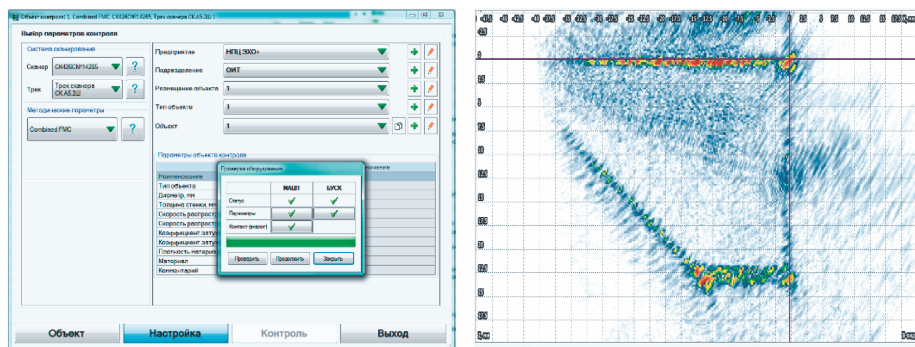


Рука с 6 степенями свободы ("ТЕХНОВОТУМ")



Дрон для УЗ-толщинометрии (RoNik)

Рис. 4. Варианты роботизации ультразвукового контроля



Самодиагностика

Качество контакта с призмой и форма призмы

Рис. 5. Элементы самодиагностики и способ проверки качества контакта с призмой ФР

самодиагностику: при опросе сообщает номера версий программного обеспечения, параметры и возвращает свое состояние после самотестирования. Если какие-то из модулей не прошли тест, выводится диалог с пояснениями по возникшей проблеме (рис. 5).

Проверка линейности усилителя

Периодическая проверка линейности усилителя выполняется автоматически при изменении диапазона усилителя в диапазоне не менее 24 дБ и замере амплитуды эхосигнала от выбранного отражателя.

Проверка акустического контакта

Для слежения за качеством акустического контакта к каждому каналу сбора данных в режиме ФР (фазированные решетки) или ЦФА (цифровая фокусировка антенных решеток) может быть создан отдельный канал для замера амплитуды донного сигнала при использовании продольных волн. Канал может быть как совмещенным (для одной ФР), так и отдельным (для двух ФР, расположенных по обе стороны от сварного шва). В зависимости от требований методики контроля устанавливается недопустимый уровень падения амплитуды этого сигнала (в диапазоне 3 ... 6 дБ), при котором возникает индикация потери акустического контакта.

Для проверки качества акустического контакта ФР и сменной призмы достаточно визуализировать изображение, указав скорость звука в объекте контроля, равной скорости звука в призме. В результате визуализируется граница раздела призма–объект и геометрия самой призмы (см. рис. 5).

Проверка подключенных преобразователей и призм

Ряд производителей встраивает в свои фазированные решетки чип EEPROM, который распознается дефектоскопом. Сложность здесь в том, что

отсутствует общий стандарт, обеспечивающий совместимость ФР и приборов разных производителей.

Соблюдение требований к порядку выполнения контроля

Столкновение реальности с требованиями документа может в ряде случаев привести к неизбежным отклонениям от заданных требований. В то же время программное обеспечение выполняет анализ: отклонений в выборе параметров преобразователей, траектории сканирования, наличия и качества акустического контакта, пропуска данных в целях окончательного принятия решения о соответствии фактически проведенного контроля требованиям и причинам этих отклонений.

Автоматическая обработка данных

Понимая важность снижения субъективного фактора при анализе данных АУЗК, еще в начале 2000-х годов в ООО «НПЦ «ЭХО+» велись работы по автоматизации анализа данных УЗК, в том числе с применением технологий искусственного интеллекта [3]. Однако к настоящему моменту оптимальным признан алгоритмический подход к анализу данных контроля, включающий в себя этапы [4], приведенные в табл. 1.

В результате автоматического поиска определяются следующие параметры для каждой несплошности:

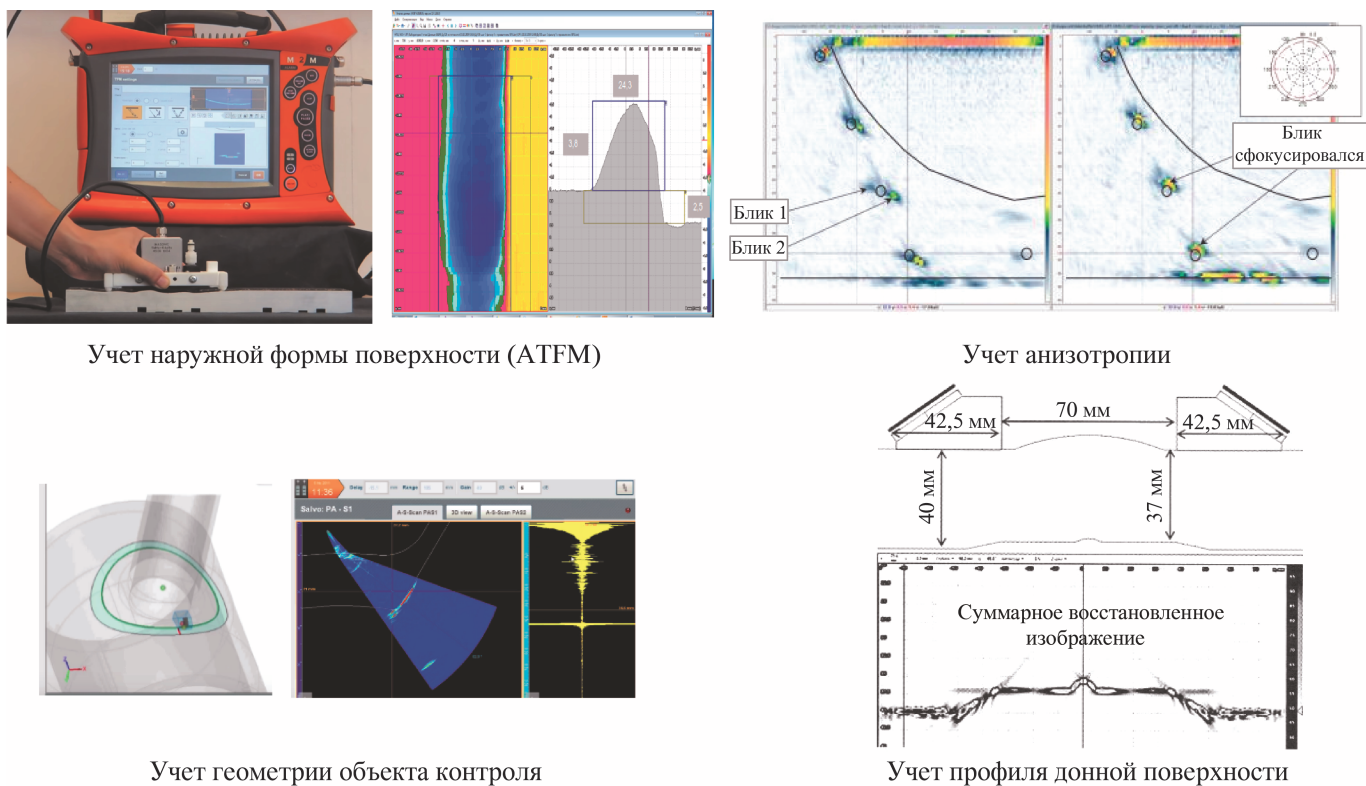
- превышение браковочного уровня (дБ);
- расположение в объекте контроля по осям X, Y, Z (мм);
- условная протяженность (мм);
- протяженность по осям X, Y, Z (мм);
- тип несплошности.

1. Основные этапы алгоритма автоматизированного поиска дефектов

Этап	Назначение этапа
Отсечка шума	Предназначена для удаления низкоамплитудного шума на изображении. Проверяется каждая точка изображения, если амплитуда в этой точке ниже заданного уровня, то амплитуда приравнивается к нулю
Фильтрация изображения	Предназначена для удаления высокоамплитудного шума на изображении. Проводится путем сглаживания изображения эллиптическим фильтром. Длины полуосей и угол поворота эллипса задаются в параметрах алгоритма
Поиск локальных максимумов	В каждой плоскости фильтрованного изображения, полученного на предыдущем этапе, выполняется поиск локальных максимумов по маске в виде эллипса, которые могут соответствовать области локализации дефекта
Поиск контуров	Для каждого локального максимума послойно рассчитываются размеры контура локализации несплошности по Z и X . Проверяется каждая точка изображения, если амплитуда в этой точке больше заданного уровня отсечки от локального максимума (по умолчанию уровень -6 дБ), то точка включается в контур
Объединение контуров	Выполняется объединение контуров в каждой плоскости изображения, если расстояние между ними меньше заданного
Удаление малых контуров	Удаляются контуры, размер которых менее 50 % размера элемента разрешения (размер точечного отражателя)
Поиск 3D-контуров	Проводится объединение контуров в соседних плоскостях в 3D-контуры, если расстояние между их максимумами меньше заданной величины, пропорциональной размерам элемента разрешения
Объединение 3D-контуров	3D-контуры объединяются, если расстояние между ними меньше заданного значения, пропорционально размерам элемента разрешения
Удаление малых 3D-контуров	3D-контур удаляется, если его размеры меньше заданного значения
Определение амплитуды и условных размеров дефекта	Максимум амплитуды определяется по исходному неотфильтрованному изображению в области, ограниченной 3D-контуром
Удаление 3D-контуров несплошностей с низкой амплитудой	Удаляются 3D-контуры несплошностей с амплитудой ниже контрольного уровня
Проверка параметров несплошности по нескольким схемам контроля (положениям ПЭП)	Одна и та же несплошность может быть выявлена при контроле с различных сторон сварного соединения, а также при изменении координаты призмы относительно оси шва. При выявлении несплошностей по разным схемам контроля, в случае если перекрытие рамок несплошностей не превышает заданного значения, из найденных рамок несплошностей по разным схемам остается та, в которой амплитуда изображения наибольшая. Если амплитуды одинаковые, то остается та рамка, у которой протяженность больше
Определение типа несплошностей	Определяется превышение амплитудой несплошности контрольного и браковочного уровней и ее положение по толщине объекта контроля (наружная, внутренняя, подповерхностная). Также определяется, является ли несплошность объемной либо плоскостной
Сохранение списка найденных 3D-контуров несплошностей в базу данных	Все оставшиеся в результате работы алгоритма 3D-контуры несплошностей сохраняются в базу данных для текущего объекта контроля

После завершения поиска автоматически формируется заключение по результатам контроля. Данные УЗК в виде изображений и протокол работы программы автоматического поиска дефектов могут быть использованы как при-

ложение к заключению. На рис. 6 показан пример работы алгоритма автоматизированного поиска и образмеривания дефектов в испытательном образце со сварным швом толщиной 145 мм.



Учет наружной формы поверхности (ATFM)

Учет анизотропии

Учет геометрии объекта контроля

Учет профиля донной поверхности

Рис. 7. Учет неидеальности объекта контроля

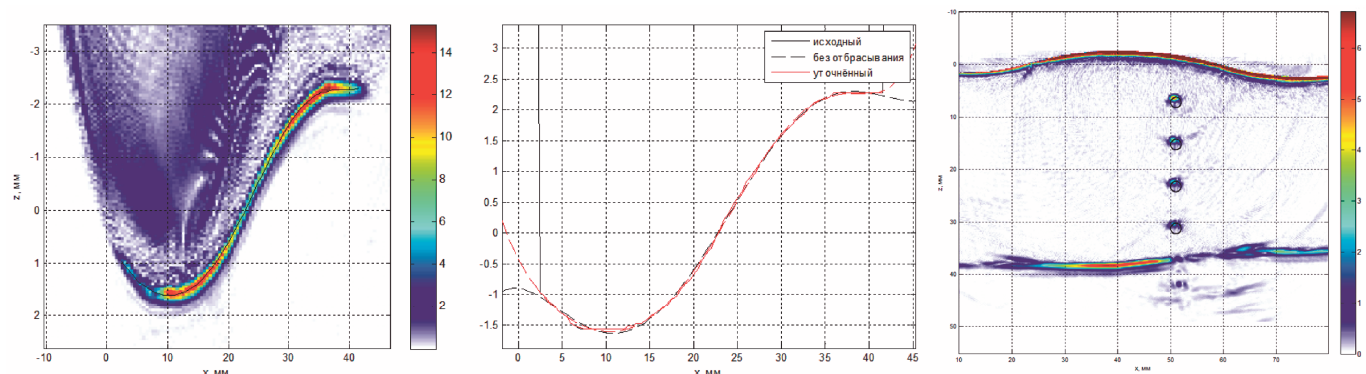


Рис. 8. Изображение поверхности тест-образца, ее профиль и ЦФА-Х-изображение отражателей

Продвинутое моделирование

Развитие вычислительных средств позволяет в ряде случаев выполнять достаточно сложное моделирование процессов распространения ультразвуковых волн в различных средах. В ООО «НПЦ «ЭХО+» применяется моделирование с применением программного средства CIVA [8, 16, 17], реализующего вычисления в приближении модели лучевых трубок, и моделирование с использованием конечно-разностных моделей [11].

Основные области применения моделей (примеры см. на рис. 9, 10):

- моделирование для расчета кривой вероятности выявления PoD;
- моделирование полей излучения и приема;
- учет сложной геометрии объекта контроля;
- учет анизотропии;
- оптимизация параметров схемы прозвучивания и преобразователей.

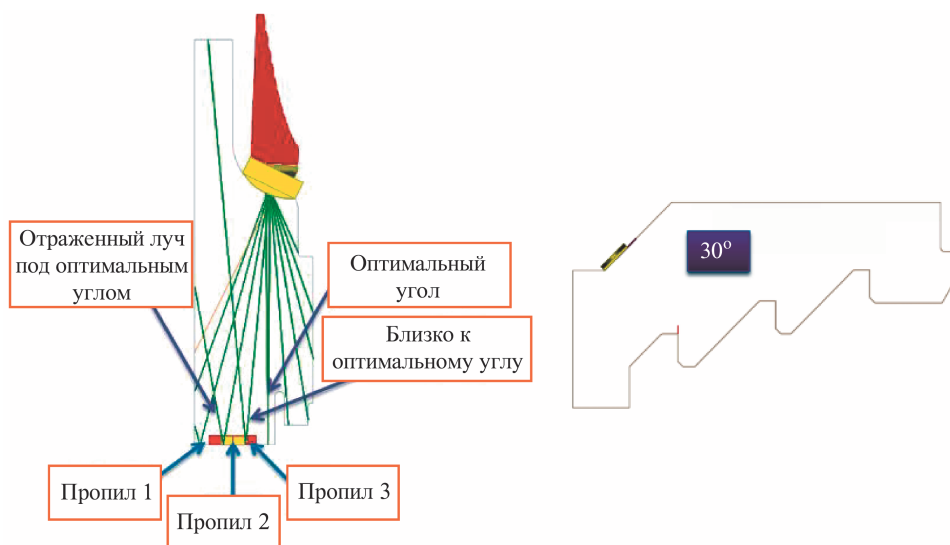


Рис. 9. Учет неидеальности объекта контроля (сложная геометрия)

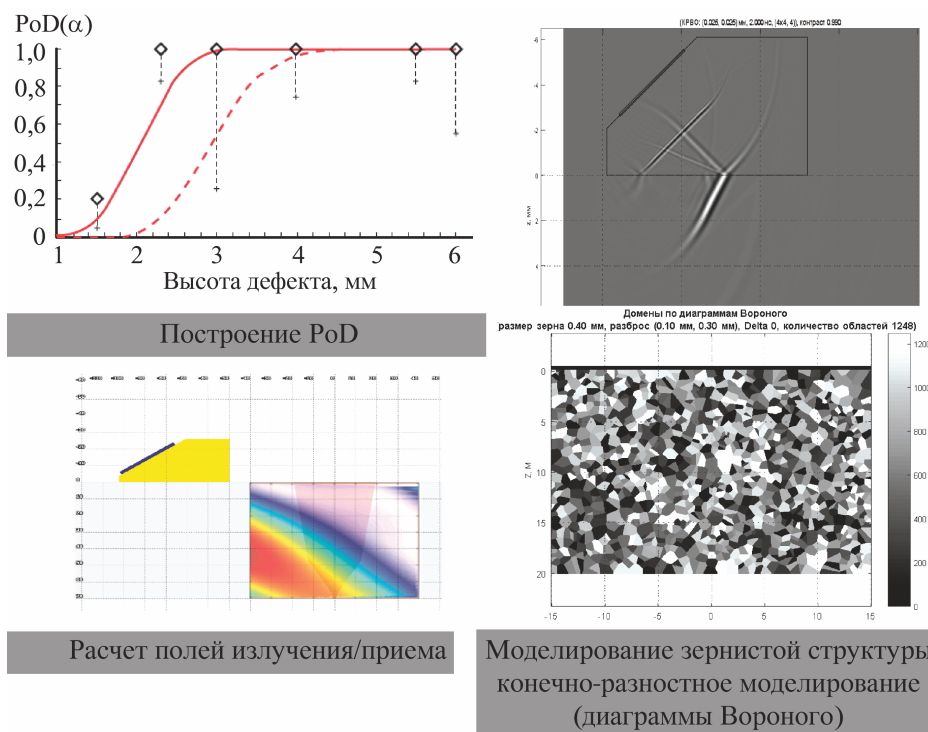


Рис. 10. Моделирование кривых выявляемости дефекта, расчет поля фазированной решетки, применение конечно-разностного моделирования и диаграмм Вороного

Blockchain и цифровая подпись

Одного формального проведения контроля может быть недостаточно для обеспечения целостности опасного промышленного объекта. Нередки случаи, когда под «флагом» определенной лаборатории выпускаются поддельные заключения по результатам контроля. Преодолеть эту беду должно требование 100%-ной фиксации результатов

контроля на электронном носителе, а защитить само заключение от подделки можно или с помощью технологии Blockchain (в идеале вся исполнительная документация должна быть создана с применением этой технологии, гарантирующей неизменность данных), или с помощью одной из технологий, реализующих электронную цифровую подпись, например в виде зашифрованной QR-метки (рис. 11) [12].

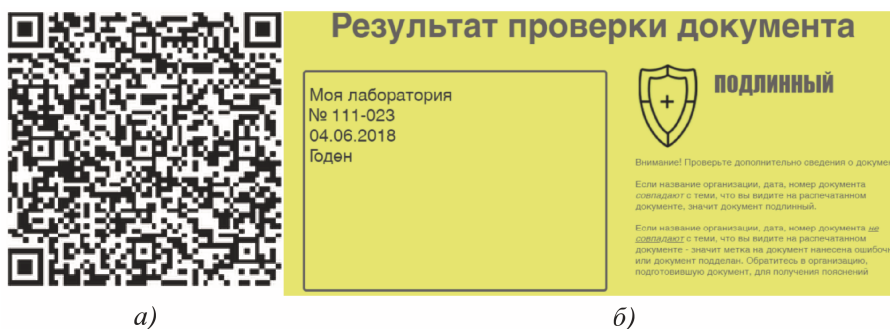


Рис. 11. Пример QR-метки (а), предназначенной для защиты заключений от подделки, и результат проверки подлинности (б)

Цифровые двойники, Big Data и машинное обучение

Обсуждая технологии уровня 4.0, нельзя обойти вниманием темы цифровых двойников, обработки больших данных и технологий искусственного интеллекта [19]. «Цифровой двойник» – это модель объекта, которая предсказывает его поведение и состояние, в том числе сроки обслуживания и остаточного ресурса. Модель постоянно обновляется и перекалибровывается. Важной частью моделей таких цифровых двойников является следующая информация:

- о фактической дефектности узлов (результаты неразрушающего контроля);
- о вероятности выявления тех или иных дефектов (кривые PoD, RoC), определенных как по результатам испытаний, так и по результатам моделирования и эксплуатации [13, 14].

Учитывая все эти модели, возможно, что в будущем уже модель будет подсказывать выбор конструкции, материалов и способа производства, оптимизирующие расходы на обслуживание и продляющие срок эксплуатации.

Методы машинного обучения как одной из дисциплин области искусственного интеллекта (AI) позволяют выполнять классификацию и предсказания, выявляя скрытые закономерности. Обучение возможно с учителем или самостоятельное. Если обучаемая нейросеть имеет много скрытых слоев, то обучение называется глубоким.

Массовое распространение машинного обучения в различных отраслях промышленности связано в том числе с тем, что:

- широко распространены готовые библиотеки алгоритмов (для Python, Matlab);
- имеются готовые наборы данных для обучения алгоритмов – доступные или открытые, или частные;
- есть «железо» для параллельных вычислений (особенно когда схлынула волна майнинга биткойна);
- существует запрос общества на такие технологии, как автопилоты для машин, диагностика в медицине или в онлайн-коммерции.

Как показано на рис. 12, позаимствованном из доклада [15], внедрение алгоритмов искусственного



Рис. 12. Этапы внедрения технологий искусственного интеллекта: ИИ-модель – модель с поддержкой искусственного интеллекта

интеллекта состоит из множества шагов, включающих помимо разработки модели с поддержкой искусственного интеллекта как таковой еще и физический уровень (датчики, файлы и базы данных), и уровень подготовки данных к анализу. Наибольший интерес и наибольшую сложность представляют сбор и разметка первичных данных для обучения.

Компаниями и лабораториями, выполняющими УЗК, накоплено множество данных ФАР, ЦФА, TOFD, полученных при механизированном или автоматизированном УЗК. Целесообразно применять к этим данным алгоритмы автоматического анализа данных: как для облегчения рутинной работы оператора, так и для обеспечения аудита за качеством выполняемых работ. Здесь на помощь может также прийти применение математического моделирования, в том числе моделирования ультразвукового контроля [16, 17]. Перспективным выглядит подход, когда данными для обучения алгоритмов искусственного интеллекта специалисты отрасли начнут делиться друг с другом и создавать открытые базы знаний, содержащие анонимизированные размеченные данные контроля. Некоторая сложность состоит в том, что пока не выработан общепринятый стандарт по разметке данных АУЗК.

Несколько достаточно актуальных задач для АУЗК могут быть реализованы с применением тех или иных технологий искусственного интеллекта:

- классификации по типам дефектов (например, плоскостные и объемные) или тренировки алгоритма на дефекты определенного типа, например на трещины; для ФР-режима или для метода TOFD интересной задачей является выявление признаков поперечной трещины;
- автоматического анализа данных, полученных при волноводном распространении ультразвука в трубопроводе;
- мониторинга изменений в состоянии объекта при повторном контроле;
- поиска дефектов на фоне конструктивных отражателей (эта задача актуальна и для УЗК с применением ФАР, и для анализа TOFD-данных);
- «цифрового слепок» и проверки дубликатов в базе данных. Важной задачей для эксплуатирующей организации или строительного подрядчика является контроль за добросовестным исполнением подрядчиком работ по неразрушающему контролю. Для проверки целостности данных может служить «цифровой слепок» сварного шва по данным УЗК – характерные индикации от корня шва, анализируемые на повышенной чувствительности [18], по аналогии с подобным механизмом, применяемым при проверке дублирования снимков при радиографическом контроле.

Выводы

Отрасль неразрушающего контроля и технической диагностики достойно встречает вызовы четвертой научно-технической революции, быть может, несколько медленнее, чем в ряде других отраслей.

С точки зрения заказчика все больший интерес представляет получение продукта, который бы объединял в себе средства как для диагностики, мониторинга, неразрушающего контроля, так и для проверки целостности собранных данных, обработки их и принятия решения о сроках обслуживания и эксплуатации объекта. Таким образом, неизбежно появление или вертикальная интеграция компаний, которые могут объединить свою техническую экспертизу с IT-инфраструктурой заказчика.

При этом создаваемые системы контроля приобретают все больше сложных функций и требуют более интенсивной подготовки и тренировки специалистов, выполняющих контроль. Как указано в обзорной статье [19]: «Эксперт по неразрушающему контролю может постепенно становиться специалистом по данным, который понимает как технические, так и бизнес-задачи и разбирается в методах управления данными и технологиях машинного обучения».

В отрасли назревает необходимость интеграции усилий производителей оборудования для УЗК в целях:

- унификации способов представления, описания и стандартов обработки данных УЗК;
- унификации типов разъемов для фазированных решеток и сканеров, подключаемых чипов для автоматической идентификации фазированных решеток;
- создания хранилища размеченных данных контроля с тем, чтобы стимулировать разработчиков алгоритмов автоматизации анализа данных, машинного обучения, тренировать свои программы и участвовать в конкурсах наподобие реализуемых на сайте Kaggle.com для данных медицинской диагностики.

Производство (системы контроля, программное обеспечение) и услуги (разработки уникальных систем, проведение контроля, консалтинг) ООО «НПЦ «ЭХО» как высокотехнологичной компании с сильным IT-компонентом отвечают вызовам четвертой промышленной революции в области неразрушающего контроля и технической диагностики.

Библиографический список

1. Тайер П. Неизбежность четвертой промышленной революции и роль НК и мониторинга // В мире НК. 2018. Т. 21. С. 5 – 8.
2. Wintle J. B., Kenzie B. W., Amphlett G. J., Smalley S. Best practice for risk based inspection as a part of plant integrity management HSE. Health and Safety Executive, 2001. 186 p.

3. **Бадалян В. Г.** Автоматизация оценки параметров дефектов в системах АУЗК с когерентной обработкой данных // Контроль. Диагностика. 2010. № 1. С. 57 – 64, 69.
4. **Базулин А. Е., Кокорев С. А., Тихонов Д. С.** Аттестация системы и методики ультразвукового контроля с полным циклом автоматизации // 10-я МНТК «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР» / ОКБ «ГИДРОПРЕСС», 16 – 19 мая 2017 г., Подольск, Россия. Подольск, 2017.
5. **Базулин А. Е., Базулин Е. Г.** Применение антенных решеток и кремнийорганического полимера в качестве иммерсионной среды для проведения ультразвукового контроля объектов с неровной поверхностью // Дефектоскопия. 2014. № 7. С. 3 – 11.
6. **Casula O., Toullelan G., Roy O., Dumas Ph.** Ultrasonic nondestructive testing of complex components with flexible phased-array transducers // 10th ECNDT. Moscow, Russia, June 7 – 11, 2009. М., 2009.
7. **Пронин В. В., Базулин А. Е., Тихонов Д. С., Шкатов П.Н.** Построение профиля внутренней поверхности трубопроводов ультразвуковым методом с применением технологии цифровой фокусировки антенны // Приборы. 2015. № 11. С. 16 – 26.
8. **Базулин А. Е., Базулин Е. Г., Тихонов Д. С.** Математическое моделирование при разработке и аттестации методик УЗК // Ультразвуковая дефектометрия. 30 лет: юбилейный сб. тр. ООО «НПЦ «ЭХО+». М.: ИД «Спектр», 2020. С. 137 – 152.
9. **Базулин Е. Г., Вовилкин А. Х., Тихонов Д. С.** Повышение достоверности ультразвукового контроля. Часть 1 // Контроль. Диагностика. 2015. № 8. С. 7 – 22.
10. **Авагян В. К., Базулин Е. Г.** Использование псевдоортогональных сигналов для уменьшения уровня шума при проведении ультразвукового контроля материалов с большим поглощением // Дефектоскопия. 2019. № 8. С. 3 – 13.
11. **Базулин Е. Г., Коновалов Д. А., Садыков М. С.** Метод конечных разностей во временной области. Расчет эхосигналов в анизотропных неоднородных материалах, структурный шум // Дефектоскопия. 2018. № 8. С. 3 – 11.
12. **Сервис** по защите заключений от подделок. URL: <https://www.protectmydoc.com> (дата обращения 25.12.2019).
13. **Бадалян В. Г., Самарин П. Ф.** Расчет кривых вероятности выявления дефектов в сварных соединениях трубопроводов АЭС. Доклад. Презентация // 20-я Всероссийская конференция по неразрушающему контролю и технической диагностике, Москва, 3 – 6 марта 2014 г. М., 2014. С. 92 – 94.
14. **Бадалян В. Г.** Риск-ориентированный подход в диагностике и ультразвуковая дефектометрия // Ультразвуковая дефектометрия. 30 лет: юбилейный сб. тр. ООО «НПЦ «ЭХО+». М.: ИД «Спектр», 2020. С. 116 – 124.
15. **Туревский А.** Keynote: Искусственный Интеллект / The MathWorks, Inc. URL: <https://exponenta.ru/events/2y10cfn8nrcoc3chtkf6u5ebzuoouiy1j6othpy7x8wpwafvuj7ps> (дата обращения 20.01.2020)
16. **Бадалян В. Г., Базулин Е. Г., Базулин А. Е. и др.** Использование моделирования для оптимизации методик УЗК // Сварка и диагностика. 2014. № 6. С. 18 – 22.
17. **Бадалян В. Г., Базулин Е. Г., Базулин А. Е. и др.** Разработка и аттестация методик АУЗК с использованием программного комплекса CIVA // Ультразвуковая дефектометрия. 25 лет: юбилейн. сб. тр. ООО НПЦ «ЭХО+» / под ред. А.Х. Вовилкина. М. – СПб.: СВЕН, 2015. С. 92 – 100.
18. **Sednev D., Kataeva O., Abramets V. et al.** Ultrasonic fingerprinting by phased array transducer // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. Bristol, 2016. V. 135.
19. **Wunderlich Ch., Tschöpe C., Duckhorn F.** Advanced methods in NDE using machine learning approaches // AIP Conference Proceedings. 2018. V. 1949. 020022.