

ВНУТРИТРУБНАЯ ДЕФЕКТОСКОПИЯ ГАЗОТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ



САМОКРУТОВ Андрей Анатольевич
Д-р техн. наук, Национальный
исследовательский университет
«МЭИ», Москва, ООО «Акустические
Контрольные Системы», Москва



ВОРОНЧИХИН Станислав Юрьевич
АО «ИнтроСкан Технолоджи»,
г. Чайковский



СЕДЕЛЕВ Юрий Анатольевич
ООО «ЭНТЭ», г. Чайковский

О газотранспортной системе

Единая система газоснабжения (ЕСГ) России представляет собой уникальный технологический комплекс, включающий в себя объекты добычи, переработки, транспортировки, хранения и распределения газа. ЕСГ обеспечивает непрерывный цикл поставки газа от скважины до конечного потребителя.

Благодаря централизованному управлению, большой разветвленности и наличию параллельных маршрутов транспортировки ЕСГ обладает существенным запасом надежности и способна обеспечивать бесперебойные поставки газа даже при пиковых сезонных нагрузках.

Основой Единой системы газоснабжения России, связующим звеном между месторождениями газа и его потребителями является Газотранспортная система (ГТС) ПАО «Газпром». Протяженность газотранспортной системы (рис. 1) на территории России составляет более 170 тыс. км. В транспортировке газа используются 254 компрессорных станций (КС), в состав которых входят более 700 компрессорных цехов [1].

ГТС ПАО «Газпром» обеспечивает транспортировку газа от месторождений Сибири и Крайнего Севера России европейским и азиатским потребителям. В 2019 г. Газпром поставил в европейские

страны 198,97 млрд м³ газа и 235,8 млрд м³ газа потребителям в России. Примерно 80 % экспорта приходится на страны Западной Европы; 20 % – на центрально-европейские государства [2].

Однако основная часть объектов ГТС была построена в 70-е – 80-е гг. прошлого века, поэтому в настоящее время сроки эксплуатации около 80 % газопроводов превышают 20-летний рубеж.

Для обеспечения и поддержания заданного уровня надежности объектов ГТС в ПАО «Газпром» используется система управления техническим состоянием и целостностью ГТС, которая базируется на информации о фактическом техническом состоянии трубопроводов. Наиболее информативным инструментом для получения этой информации является периодическое техническое диагностирование с использованием внутритрубных дефектоскопов (ВТД), ежегодные объемы которых составляют более 20 тыс. км.

Технологии ВТД для линейной части

Более чем на 70 % от общей протяженности ГТС состоит из линейной части магистральных газопроводов (ЛЧ МГ). Для обследования этой части ГТС начиная с 2000-х гг. получили распространение внутритрубные снаряды-дефектоскопы (СД), движущиеся в потоке газа от камеры загрузки до



Рис. 1. Схема газотранспортной системы России и Европы

приемного устройства со скоростями от 1 до 10 м/с и обеспечивающие за один проход контроль участков протяженностью до сотни километров.

На российском рынке услуг ВТД доминирует компания ООО «НПЦ ВТД», обладающая полным циклом технологий в этой области - от разработки средств ВТД и их производства до эксплуатации, анализа данных и выдачи заключений о техническом состоянии [3].

В большинстве снарядов-дефектоскопов, предназначенных для контроля газопроводов, используется магнитный метод контроля, основанный на регистрации магнитных полей рассеяния, возникающих при наличии дефектов в металлической стенке трубы при ее намагничивании.

Намагничивание стенки трубопровода обеспечивается с помощью постоянных магнитов, размещенных на цилиндрическом ядре, и гибких металлических щеток, передающих магнитный поток от магнитов в стенку трубы, а для регистрации полей рассеивания используется множество датчиков (как правило, датчиков Холла), расположенных между полюсами системы намагничивания. При этом применяются продольная относительно оси трубы (в англоязычной литературе Magnetic Flux Leakage – MFL) или поперечная (Transverse Fi-

eld Inspection – TFI) схемы намагничивания, необходимые соответственно для регистрации трещиноподобных дефектов поперечной или продольной ориентации. Для каждого типа намагничивания требуется отдельная магнитная система, поэтому подобные снаряды-дефектоскопы отличаются по конструкции (рис. 2). Так же для каждого диаметра трубопровода в диапазоне от 219 мм (8") до 1420 мм (56") требуется отдельный вариант конструкции СД.

Процедура диагностики включает загрузку СД в работающий участок ЛЧ МГ через специальный шлюз (камера загрузки), далее происходит перемещение СД под давлением газа по участку ЛЧ МГ и регистрация при этом информации, поступающей от датчиков. После завершения маршрута и выгрузки СД через приемный шлюз осуществляются передача зарегистрированных диагностических данных в центр обработки данных (ЦОД), анализ полученной информации специалистами и подготовка отчетов.

Результатом контроля подобных систем является набор двумерных разверток деталей ЛЧ МГ (отдельной трубы) с указанием наличия аномалий, их координат и дефектоскопических параметров. Эти данные могут быть представлены как

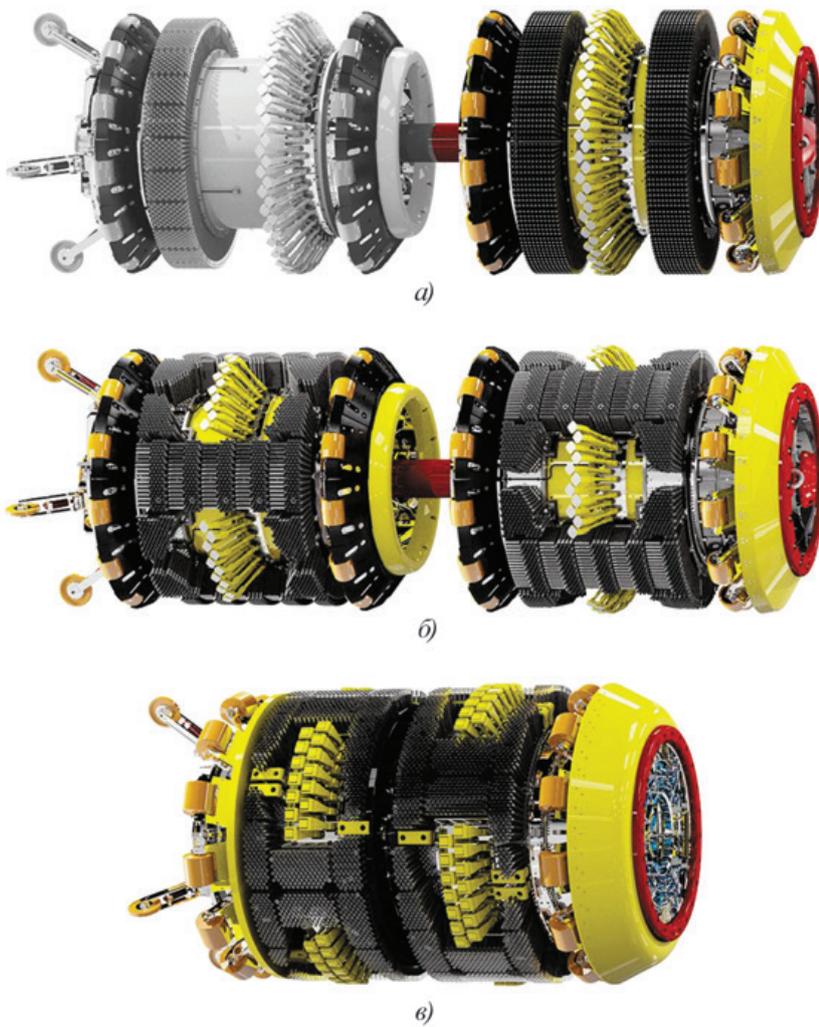


Рис. 2. Средства-дефектоскопы для ВТД линейной части ГТС: а – магнитные для продольного намагничивания; б – магнитные для поперечного намагничивания; в – электромагнитоакустические (ЭМА)

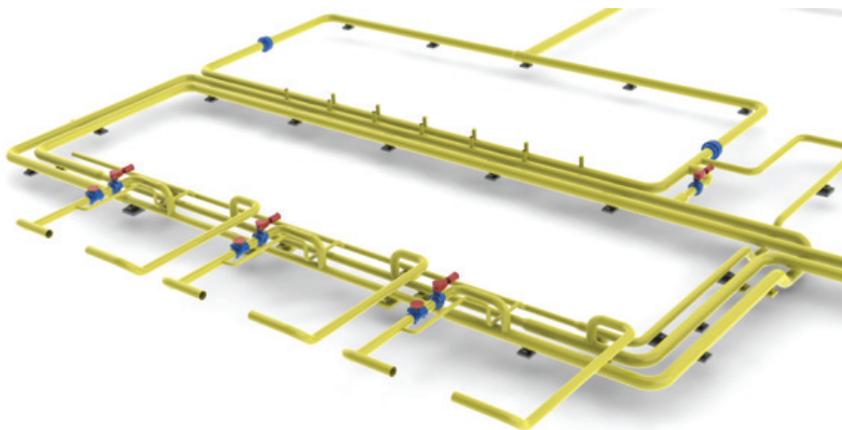


Рис. 3. Схематическое изображение подземной части ТТ КС одного компрессорного цеха

в печатном отчете, так и в электронной форме для передачи в вышестоящую информационную систему.

Чувствительность к дефектам для магнитных методов контроля может достигать 10 % (высота язв и зон коррозии металла) от толщины стенки для объемных и 15 % (высота трещин) для трещиноподобных [4].

Для повышения дефектоскопической чувствительности и расширения диагностических возможностей средств-дефектоскопов в последние годы получили развитие технологии ВТД с использованием электромагнитно-акустического (ЭМА) способа возбуждения и приема ультразвуковых (УЗ) колебаний в металле [5]. Целесообразность применения ЭМА-технологии (с учетом ее низкой энергетической эффективности по сравнению с пьезопреобразователями) для УЗ-контроля газопроводов обусловлена практической невозможностью использования контактных жидкостей в условиях ВТД ГТС. С точки зрения акустического тракта в СД данного типа реализуется эхоимпульсный метод контроля с наклонным вводом, что обеспечивает более высокую чувствительность (по сравнению с магнитным методом), позволяет селективировать типы дефектов (объемный или плоскостной) и определять области с некачественной адгезией изоляционного покрытия трубопровода.

В настоящее время это направление активно развивается и показывает перспективные результаты.

Следует отметить, что ВТД с применением СД требует соблюдения ряда условий и подготовительных процедур для контролируемого участка ГТС:

- геометрические ограничения – отсутствие отводов, неравнопроходных участков трубопроводов, сужений, деформаций;

Обобщенные данные о дефектоскопических возможностях потенциально применимых методов неразрушающего контроля

Особенности выбранных для ВТД ТТ КС методов НК	Задачи НК									
	Трещина продольная	Трещина поперечная	Коррозия внешняя	Коррозия внутренняя	Дефекты в СШ	Нестыковка кромок СШ	Отслоение изоляции	Толщинометрия	Геометрия	Чистота внутренней полости
УЗ ВМК– волноводный поперечное прозвучивание (индикаторный режим, выявление дефектов от 15% толщины стенки)	+	-	+	+	+/-	-	+/-	-	-	-
УЗ ВМК– волноводный продольное прозвучивание (индикаторный режим, выявление дефектов от 15% толщины стенки)	-	+	+	+	+/-	-	+/-	-	-	-
УЗ ЦФА– эхо-томография, СТК ВЧ АР, поперечное прозвучивание (измерительный режим, выявление дефектов от 5% толщины стенки)	+	-	+	-	+	+/-	+	+	-	-
УЗ ЦФА– эхо-томография, СТК ВЧ АР, продольное прозвучивание (измерительный режим, выявление дефектов от 5% толщины стенки)	-	+	+	-	-	-	+	+	-	-
Оптический контроль – видеокамера	-	-	-	+/-	-	-	-	-	+/-	+
ЛО – лазерно-оптическое сканирование	-	-	-	+/-	-	+	-	-	+	+

- наличие камер приема-запуска для старта и финиша СД;
- необходимость предварительной очистки участка путем предварительного прогона специальных очистных СД;
- обеспечение необходимого давления газа для движения СД.

Актуальные задачи для диагностики ГТС

Значительная часть объектов ГТС в силу различных конструктивных особенностей газопроводов не приспособлена к проведению классического ВТД с применением снарядов-дефектоскопов. Общая протяженность таких участков газопроводов превышает 53 000 км.

К указанным объектам относятся (по данным ООО «Газпром ВНИИГАЗ»):

- технологические трубопроводы (ТТ) КС – около 2500 км;
- различные переходы трубопроводов через естественные и искусственные препятствия (около 2560 км);
- перемычки трубопроводов (около 725 км);
- локальные участки линейной части МГ (более 15 750 км);

- газопроводы-отводы (около 31 876 км).

Для включения всех этих элементов ГТС в контур системы управления техническим состоянием и целостностью ГТС также необходимо обеспечить оперативное получение информации об их фактическом техническом состоянии. Наиболее очевидным путем решения данной задачи является создание и внедрение специализированных внутритрубных роботизированных диагностических комплексов (ВРДК), обеспечивающих проведение процедур неразрушающего контроля участков ГТС в условиях с перечисленными обременениями и получение требуемой диагностической информации.

Особенности контроля ТТ КС и требования к диагностическим системам

Среди перечисленных задач наиболее актуальной и первичной представляется обеспечение контроля ТТ КС и шлейфов подключения цехов КС к ЛЧ МГ. К особенностям подобных объектов с точки зрения выполнения диагностики можно отнести:

- производственный объект повышенной опасности за счет постоянного присутствия рабочего персонала;

- сложную пространственную конфигурацию ТТ КС (рис. 3);
- короткие сроки по выводу из эксплуатации компрессорного цеха;
- широкий сортамент труб и соединительных деталей (Диу 400–1420 мм);
- значительные загрязнения внутренней полости (твердые отложения, конденсат, строительный мусор).

При этом требования к дефектоскопической чувствительности и функциональным возможностям перспективных ВРДК, определенные нормативными документами ПАО «Газпром» [6], более жесткие по некоторым параметрам, чем к СД ВТД [7]. Например, для основного металла тела трубы и околошовных зон продольных сварных швов требуется выполнить поиск аномалий, при их обнаружении селективировать тип (объемный или плоский) и оценить геометрические размеры (длину, ширину, высоту). Для стыковых (кольцевых) сварных швов дополнительно необходимо определить нестыковку кромок сварного шва и при возможности измерить провис корня шва и обнаружить непровар в корне шва.

Очевидно, что для выполнения этих требований ВРДК должен иметь возможность использовать несколько методов неразрушающего контроля, оптимизированных для решения определенной задачи. Наиболее эффективными для подобных условий являются УЗ-эхоимпульсный, визуально-измерительный, лазерно-профилеметрический методы. В таблице приведены обобщенные данные о дефектоскопических возможностях потенциально применимых методов неразрушающего контроля.

Кроме того, сложная геометрия ТТ КС, необходимость прохождения наклонных и вертикальных участков, наличие за-

грязнений и препятствий в трубе потребовали использования автономной самоходной транспортной платформы, позволяющей маневрировать, преодолевать различные преграды и обеспечивать перемещение диагностических модулей.

В настоящее время на рынке ВРДК присутствуют две технологии, представляемые российскими компаниями ООО «Газпроект-ДКР» [8] и АО «ИнтроСкан Технолоджи» [9].

ВРДК «Газпроект-ДКР»

Группа компаний «Диаконт», в которую входит ООО «Газпроект-ДКР», развивает технологии ВТД с 2005 г. Результатом этой деятельности является телеуправляемый диагностический комплекс ТДК-400-М-Л.

Транспортный модуль ВРДК «ТДК-400-М-Л» (рис. 4) имеет гусеничное шасси, на котором размещаются диагностические модули различных типов. Общий вес ВРДК составляет около 80 кг. Загрузка ВРДК во внутренний объем ТТ КС осуществляется через открытый торец предварительно разрезанной трубы, обратный клапан или люк-лаз.

В качестве базовой технологии неразрушающего контроля в данном комплексе реализован УЗ-эхоимпульсный метод на основе ЭМА-преобразователей прямого или наклонного ввода колебаний в стенку трубы. ЭМА-преобразователи размещаются на телескопических штангах и перемещаются по окружности узлом ротации. Видеокамеры с подсветкой предназначены для визуальных обследований и общего контроля за процессом диагностики. Дополнительно ВРДК оснащен лазерным профилемером для визуально-измерительного контроля. Энергопитание, управление ВРДК и передача данных осуществляются через кабель длиной до 500 м, соединяющий его с мобильной лабораторией.

Технология контроля данного ВРДК заключается в перемещении ЭМА-преобразователей узлом ротации по окружности трубы при последовательном перемещении транспорта вдоль оси трубы в целях полного сканирования всей внутренней поверхности трубы и регистрации эхосигналов с шагом, обеспечивающим отсутствие мертвых зон.



Рис. 4. ВРДК «Газпроект-ДКР»

Коррозия регистрируется при установке ЭМА-преобразователей прямого ввода УЗ-поперечных волн, а трещины – при использовании ЭМА-преобразователей с наклонным вводом УЗ-колебаний поперечных волн с вертикальной поляризацией (SV-волн). Это решение, с одной стороны, обеспечивает достаточно высокую дефектоскопическую чувствительность (порядка 10 %), но с другой – приводит к ограничению производительности контроля и возникновению неконтролируемых зон при наличии загрязнений, препятствующих 100%-ному сканированию. Кроме того, с учетом существенной (обратно квадратичной) зависимости чувствительности от зазора между ЭМА-преобразователем и поверхностью объекта имеется высокая вероятность пропуска дефекта даже при наличии незначительных загрязнений.

Для обеспечения необходимого качества поверхности объекта контроля в реальных условиях компания ООО «Газпроект-ДКР» предлагает использовать предварительную гидродинамическую очистку [10] внутренней полости контролируемого участка трубопровода.

В состав мобильной лаборатории также входит программное обеспечение, выполняющее регистрацию получаемой информации, ее обработку и формирование экспресс-отчета.

ВРДК А2072 АО «ИнтроСкан Технолоджи»

АО «ИнтроСкан Технолоджи», учрежденная в 2013 г., является системным интегратором по направлению развития технологий внутритрубной дефектоскопии ТТ КС. Эта работа ведется совместно с партнерами – компаниями ООО «Акустические Контрольные Системы» (разработка и производство систем диагностики) и ООО «ЭН-



Рис. 5. Внешний вид ВРДК АО «ИнтроСкан Технолоджи» А2072 v3.7



Рис. 6. Загрузка ВРДК А2072 через технологическое отверстие

ТЭ» (исполнитель работ по диагностике и экспертизе ТТ КС). Результатом этой совместной деятельности является ВРДК типа А2072, который с 2015 г. используется при диагностике различных объектов ГТС.

Вариант ВРДК типа А2072 (рис. 5), представляемый АО «ИнтроСкан Технолоджи», реализован как автономный транспортно-диагностический модуль с аккумуляторным питанием и радиоканалом для дистанционного управления, передачи диагностических данных и видеосигнала на пульт оператора в мобильной лаборатории. Дальность

устойчивой внутритрубной радиосвязи не менее 2 км. Общий вес полного комплекта ВРДК составляет около 25 кг. Запаса энергии на борту ВРДК достаточно для 10-часовой автономной работы.

Загрузка ВРДК в рабочую зону ТТ КС выполняется через люк-лаз, обратный клапан или технологическое отверстие (рис. 6) без необходимости полного разрезания трубы.

Отличительной особенностью транспортного модуля является использование магнитных мотор-колес с общим усилием притяжения порядка 120 кг. Это ре-

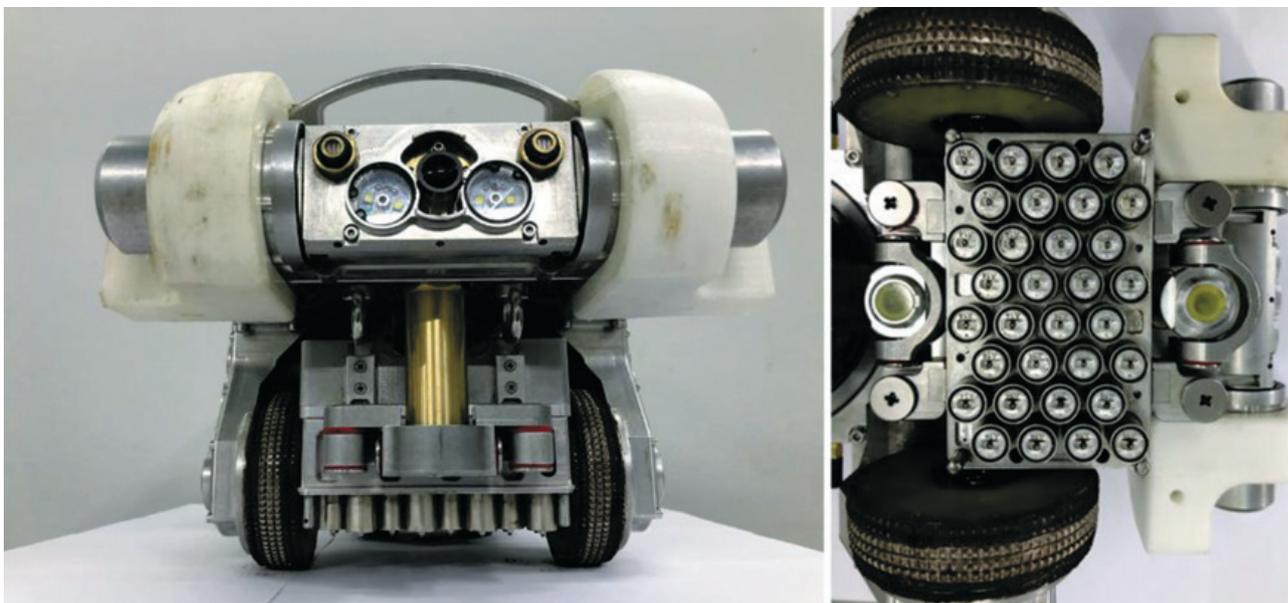


Рис. 7. Расположение на А2075 антенной решетке с СТК-преобразователями

шение обеспечивает возможность передвижения ВРДК внутри ТТ КС как по произвольным траекториям, так и по ее вертикальным участкам, что обеспечивает возможность преодоления препятствий, объезда загрязнений и доступа ко всем элементам ТТ КС без необходимости выполнения дополнительных резов трубы.

Частью диагностического оснащения ВРДК являются видеокамеры, работающие совместно с лазерными проекторами для визуально-измерительного и общего контроля со стороны оператора за процессом диагностики.

Но основным методом диагностики для данной системы является ультразвуковой эхоимпульсный волноводный метод [11], в некоторых случаях называемый методом направленных волн (в англоязычной литературе LRUT – Long Range Ultrasonic Testing или Guided Wave), который позволяет регистрировать эхосигналы на больших расстояниях (до нескольких десятков метров) от места расположения УЗ-преобразователя. Физической основой для него является эффект распространения УЗ-колебаний в пластинах на большие расстояния при определенных комбинациях типов волн, длины волны и толщины стенки.

Возбуждение и прием УЗ-колебаний обеспечивается фазированной 32-элементной антенной решеткой (АР), интегрированной в транспортный модуль сканера (рис. 7).

Каждый элемент этой антенной решетки представляет собой ультразвуковой пьезоэлектрический преобразователь с сухим точечным контактом (СТК) между игольчатым протектором и поверхностью металла. Для обеспечения надежного аку-

стического контакта на шероховатых и волнистых поверхностях СТК-преобразователи оснащены индивидуальным адаптивным прижимом. Применение технологии СТК позволяет не только отказаться от контактной жидкости при УЗ-контроле, но и работать при наличии на внутренней поверхности трубы пылемазляных отложений толщиной до 5 мм. Диапазон рабочих частот СТК преобразователей составляет 30 – 300 кГц.

Контроль газопровода с применением ВРДК заключается в линейном пошаговом перемещении транспортного модуля вдоль оси трубы, в излучении и регистрации эхосигналов в перпендикулярном направлении (вдоль окружности трубы). При наличии дефектов или аномалий в стенке трубы регистрируется соответствующий отклик, после анализа которого можно определить параметры дефекта. Дополнительно определяется номинальная толщина стенки трубы в области расположения АР. После прохождения каждой детали полученные данные оперативно передаются по радиоканалу на компьютер оператора в мобильной лаборатории для дополнительной пространственно-временной обработки и формирования экспресс-отчета.

Таким образом, пройдя по одной линии вдоль оси трубы, ВРДК А2072 формирует полный образ ее развертки (дефектограммы), на котором отмечаются места аномалий и дефектных областей (рис. 8) и оценивается размер дефектов на основании амплитуды реконструированных сигналов. Выбор положения линии прохода на окружности трубы проводится из соображений минимальной загрязненности траектории. Для повышения достоверности результатов возможно выполнение дубли-

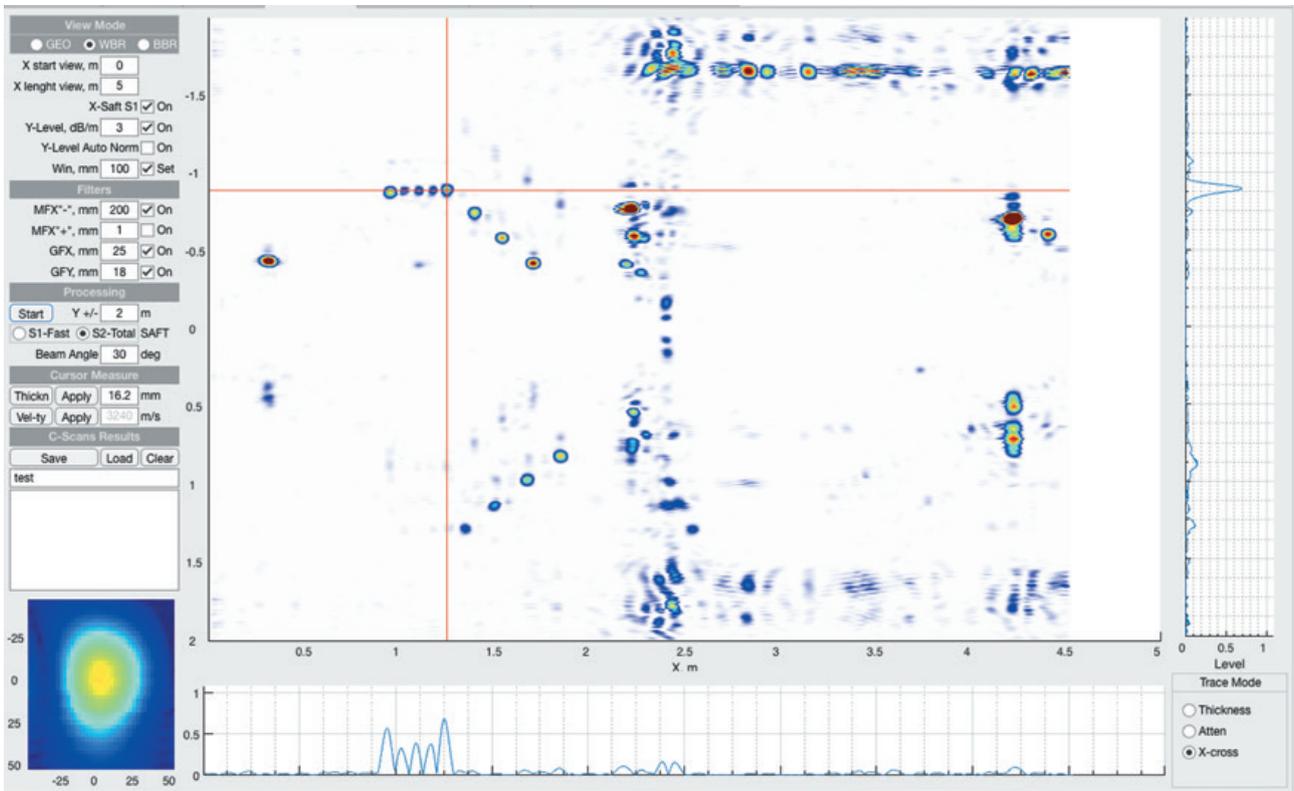


Рис. 8. Пример дефектограммы, полученной на тестовом образце трубы Ду 1420 с помощью ВРДК А2072

рующего прохода по другой линии и получение совместной дефектограммы путем их наложения.

Селекция типов дефектов при данном методе контроля осуществляется за счет получения эхосигналов в нескольких частотных поддиапазонах (в пределах полосы пропускания преобразователей АР) и анализа соотношений амплитуд эхосигналов для различных частот. Для объемных и плоскостных дефектов эти соотношения существенно отличаются, что позволяет идентифицировать тип отражателя с высокой степенью достоверности.

Получаемая от ВРДК комплексная дефектоскопическая информация позволяет экспертам подготавливать заключения о текущем состоянии диагностируемых участков ГТС и включать результаты анализа в систему управления техническим состоянием и целостностью ГТС ПАО «Газпром».

Полученные результаты и перспективы развития технологий ВТД ГТС

В настоящее время с помощью описанных ВРДК выполняется диагностика в основном на ТТ КС с совокупным годовым объемом более 200 км. С учетом 5–7-летней цикличности процедур диагностики совокупный вклад этих технологий составляет несколько тысяч километров, что закрывает часть актуальных вопросов по обеспечению

безопасной эксплуатации ГТС, но явно недостаточно для обеспечения 100%-ной диагностики всех участков ГТС.

Ограниченное применение технологий ВРДК обусловлено несколькими причинами.

Во-первых, это низкая производительность контроля, составляющая порядка 100 погонных метров за смену. Увеличение объема работ за счет большего количества лабораторий с ВРДК тормозится высокой стоимостью данной техники и, соответственно, стоимостью самого контроля.

Во-вторых, неприменимость существующих ВРДК для ряда задач. Например, для контроля подводных переходов, где требуется обеспечивать контроль на удаленностях от места загрузки более чем 2 км, или часть участка имеет загрязнения и нет возможности применить очистку.

Таким образом, существует актуальная задача создания технологии ВТД с большей производительностью, большими дальностью контроля и временем автономной работы при высокой достоверности результатов контроля и рассчитанной для работы на участках, не пригодных для использования классических средств ВТД.

С учетом имеющегося научно-технического потенциала у российских специалистов в области неразрушающего контроля и технической диагно-

стики и при поддержке данной деятельности со стороны ПАО «Газпром» представляется реальным решение этой задачи в ближайшей обозримой перспективе.

Библиографический список

1. О ПАО «Газпром»: производство, транспортировка. URL: <https://www.gazprom.ru/about/production/transportation/>
2. ООО «Газпром экспорт»: статистика поставок. URL: <http://www.gazpromexport.ru/statistics/>
3. ООО «НПЦ «ВТД»: внутритрубная диагностика. URL: <https://www.npcvtd.ru/services/vnutritrubnaya-diagnostika/>
4. <http://vesti-gas.ru/sites/default/files/attachments/vgn-3-40-2019-140-145.pdf>
5. Ермолов И.Н., Ланге Ю.В. Ультразвуковой контроль // Неразрушающий контроль: справочник: в 8 т. Т. 3 / под ред. В.В. Клюева. 2-е изд., дораб. М.: Машиностроение, 2008. С. 72–74.
6. Р Газпром 2-2.3-1192–2020. Технические требования к автоматизированным диагностическим комплексам для технического диагностирования технологических трубопроводов компрессорных станций // Газовая промышленность. 2020. № 2.
7. ГОСТ 55999–2014. Внутритрубное техническое диагностирование газопроводов. М.: Стандартинформ, 2019.
8. ООО «Газпроект-ДКР»: ВТД для газовой промышленности. URL: <http://gazprojekt-dkr.ru/vnutritrubnaya-diagnostika/vtd-dlya-gazovoj-promyshlennosti>
9. АО «ИнтроСкан Технолоджи»: технологии. URL: <https://www.introscan.ru/#services>
10. ООО «Газпроект-ДКР»: гидроочистка. URL: <http://gazprojekt-dkr.ru/gidroochistka>
11. Пат. RU 2629896. Способ ультразвукового контроля трубопровода и система для его осуществления / А.А. Самокрутов, Ю.А. Седелев, С.Ю. Ворончихин и др.; опубл. 09.04.2017. ■

О ДЕФЕКТОСКОПИСТАХ В ХУДОЖЕСТВЕННОЙ ЛИТЕРАТУРЕ

Всякому специалисту приятно, когда о его профессии можно почитать в книжке. Повезло морякам, пиратам, космонавтам, филологам и даже инженерам. А вот про дефектоскопистов и дефектоскопию не так много художественной литературы написано.

За все время, что я читаю, наткнулся всего на несколько случаев упоминания о дефектоскопах. И два из них в рассказах Станислава Лема. Вот кого можно назвать популяризатором нашей профессии.

Цитата 1

— Ну, только хороший врач-специалист после всестороннего обследования смог бы понять...

— А я — нет?

— Нет. Конечно, если не применять каких-нибудь специальных методов.

— Рентген?

— Вы сообразительны! Но у вас на борту не будет такой аппаратуры.

— Чувствуется непрофессиональный подход, — сказал Пиркс. — Я могу получить из реактора сколько угодно изотопов, ну и, кроме того, на борту должны быть аппараты для дефектоскопии; значит, рентген мне вовсе не понадобится.

Станислав Лем «Дознание», 1968 г.

Цитата 2

Пилот ждал каких-то еще замечаний, похожих на похвалу, но Лондон повернулся и окинул его взглядом — от растрепанных светлых волос до белых башмаков скафандра.

— Завтра отправлю техника сделать дефектоскопию... Вы поставили реактор на холостой ход?

— Нет. Выключил совсем. Как в доке.

— Хорошо.

Станислав Лем «Фиаско», 1986 г.



Контроль роторов, дефектоскоп Крауткремер, 1950-е годы

Цитата 3

— Комлева можно понять, — ответил Янин. — Но все равно это глупо... Вы мне лучше скажите, почему вампиры предпочитают кровь вновь прибывших?

— Я не раз задумывался над этим. — Новицкий вдруг встал и зашагал своими широкими шагами из угла в угол. — Это действительно странно, но, может быть, вампир, обладая чутким ультразвуковым аппаратом, способен не только находить уязвимые места в броне, но и зондировать внутреннее состояние живого существа? Вспомните ультразвуковые дефектоскопы...

Геннадий Тищенко «Вампир Гейномиуса», 1977 г.

Цитата 4

Его физика, его математика фактически хозяйствовали на заводе. Полтора года бездействовал ультразвуковой дефектоскоп по проверке отливков. Крылов занялся ультразвуком и наладил установку.

Даниил Гранин «Иду на грозу», 1966 г.

Не густо, ой не густо. И надо отметить, уже в 1960-х гг. что Лем, что Гранин писали о дефектоскопах. Это к вопросу о частотном упоминании ультразвукового и рентгеновского контроля по данным литературы.

А. Е. Базулин, канд. техн. наук, ООО «НПЦ «ЭХО+»
https://ndtpm.wordpress.com/2013/01/16/fiction_ndt/