

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ДЕФЕКТОМЕТРИЯ: ОТ СПЕКТРАЛЬНОГО ОБРАЗА ДО КОГЕРЕНТНОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ ПОРТРЕТА ДЕФЕКТОВ* (продолжение)**

ЧАСТЬ 2. УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ДЕФЕКТОМЕТРИЯ НА ОСНОВЕ КОГЕРЕНТНЫХ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЕФЕКТОВ



ВОПИЛКИН Алексей Харитонович

Д-р техн. наук, проф., ген. директор, ООО «НПЦ «ЭХО+», Москва

При создании в НПО «ЦНИИТМАШ» методов распознавания типа дефектов на основе спектральных и дифракционных сигналов меня все время преследовала одна и та же мысль: все эти методики дают очень грубую, с большой погрешностью оценку типа и размеров реальных дефектов и далеко не всегда реализуемые. Собственно, эти методики еще нельзя было назвать дефектометрическими, а лишь оценочными. Но на тот момент времени ничего другого придумать было нельзя. Тем не менее поиски более объективных и точных методов продолжались. На продолжение поисков нас подтолкнула проблема со сварными швами роторов турбин, выпускаемых Харьковским турбинным заводом. Конструкция шва была такова, что неизбежно в корне шва образовывались трещины. Причем обычными методиками они либо не выявлялись, либо выявлялись, но определить, что это трещина, а не пора или непровар, возможности не было. При этом было два случая разрушения роторов в процессе их эксплуатации, едва не приведших к катастрофе.

Однажды в 1988 году меня и И. Н. Ермолова пригласили в Акустический институт АН СССР ознакомиться с исследованиями, проводимыми группой ученых, возглавляемых В. Г. Бадаляном, по разработке акустических голографических методов визуализации дефектов. Это был принципиально новый подход к оценке параметров дефектов. Оказывается, можно увидеть изображение дефекта на экране монитора. И хотя установка, которую они собрали, представляла собой стойку высотой 2 м, а расчеты проводились на стационарной ЭВМ БЭСМ-6, исследования показали многообещающими.

В это время в стране начали происходить тектонические сдвиги. Клич «Перестройка. Ускорение. Гласность», провозглашенный М. С. Горбачевым, народ принял с большим энтузиазмом. Вся страна пришла в движение. Как грибы после дождя начали создаваться кооперативы, малые предприятия, коммерческие структуры. Именно в это время я при участии академика РАН Н. П. Алешина создал компанию под названием ООО «Научно-производственный центр неразрушающего контроля «ЭХО+» (ООО «НПЦ «ЭХО+»).

На мое счастье, как раз группа, возглавляемая В. Г. Бадаляном, согласилась перейти во вновь организованную компанию. В нее вошли восемь молодых, энергичных, талантливых ребят, и работа закипела. Компания ведет свой отчет со 2 апреля 1990 года. Этот день стал первым рабочим днем первого сотрудника, т.е. меня. У нас на первых порах не было ничего, кроме голого энтузиазма, граничащего с самопожертвованием. Подробно вехи становления и развития нашей компании я описал в изданной мной книге «Без истории нет будущего», которую можно скачать с сайта компании: <http://www.echoplus.ru/prochee.html>.

* Статья из книги «Ультразвуковая дефектометрия. 30 лет»: юбилейный сборник трудов ООО «НПЦ «ЭХО+». М.: Издательский дом «Спектр», 2020. С. 7–24.

** Начало см. «Территория NDT» 2020 . №2. Часть 1

Когерентные методы с обработкой во временной области общепринято называть SAFT (Synthetic Aperture Focusing Technique). В наших ранних работах мы показали, что в рамках дифракционной теории алгоритм SAFT можно реализовать как во временной области, так и в области пространственных частот. Рассмотрим подробнее эти методы. Оба алгоритма дают близкие результаты, но временной алгоритм требует значительно больших машинных ресурсов. В начале 1990-х годов персональная компьютерная техника была еще очень примитивная и не позволяла реализовать временной алгоритм, поэтому выбор пал на частотный алгоритм. Этот алгоритм называется «проекция в спектральном пространстве» (ПСП), метод назван акустической голографией.

Упрощенно технология акустической голографии состоит в следующем. В изделие излучают короткие ультразвуковые импульсы с широкой диаграммой направленности ($30-60^\circ$), сканируют ПЭПом с малым шагом ($0,1-0,5$ мм) по поверхности изделия строго по прямым линиям, в каждой точке сканирования принимают отраженные от дефекта сигналы и оцифровывают их. Обработывают полученную последовательность сигналов с помощью алгоритма ПСП, визуализируют полученные сигналы в виде проекции изображения на три плоскости (В, С и D).

Физически это означает, что путем измерения фазовых сдвигов между излученным и принятым сигналами во всем пространстве контролируемого изделия на приеме формируется узкий, слабо расходящийся пучок шириной порядка 1 мм. Тем самым удается визуализировать отдельные сечения, сложив которые, можно получить изображение дефекта. При этом разрешающая способность может по-

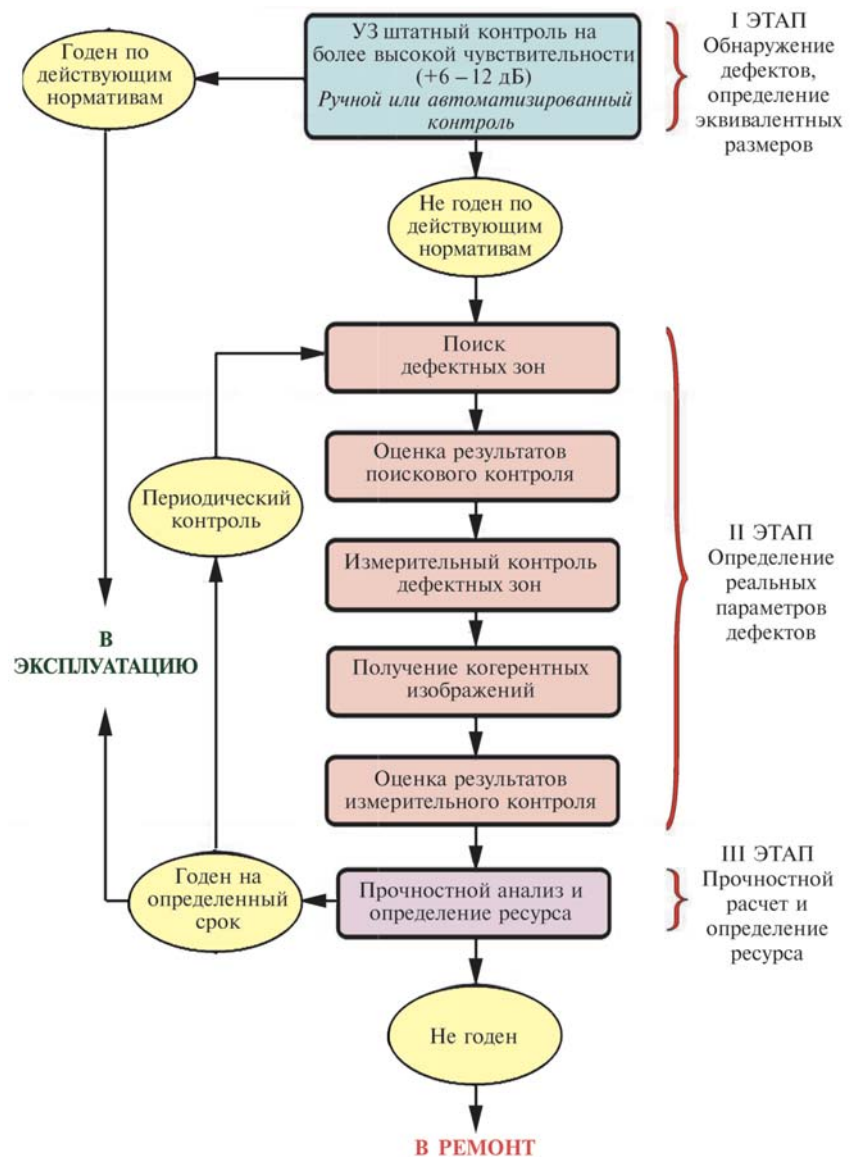


Рис. 8. Комплексная технология УЗ-контроля сварных соединений с использованием систем серии «АВГУР»

вышаться в десятки раз. В качестве подтверждения высокой разрешающей способности на рис. 10 и 11 представлены результаты измерения длины дефектов (а) и их высоты (б) в отдельных сечениях. Приведенный массив данных из 120 измерений имеет среднеквадратичную ошибку измерения высоты дефектов $c=0,86$. Погрешность измерения высоты дефектов составляет $\pm 1,5$ мм, длины – 5 мм.

Шесть лет у нас ушло на создание первого в России, да, по-

жалуй, и в мире промышленного образца ультразвуковой голографической системы, названной «АВГУР 4.2». Название пришло из древнегреческой мифологии, согласно которой жрецы (авгуры) по полету птиц определяли будущее.

Наша деятельность на АЭС началась в 1996 году. Я на удачу позвонил на Смоленскую атомную станцию. К моему удивлению, трубку снял сам тогдашний директор Евгений Михайлович Сафрыгин. Я представился, рас-



Рис. 9. Система «АВГУР 4.2» образца 2000 года

сказал о наших разработках. Уже на следующий день мы в его кабинете продемонстрировали «АВГУР 4.2» прямо на его столе. Директора так впечатлили результаты, что он тут же вызвал начальника лаборатории металлов и приказал ему заключить договор на эксплуатационный контроль проблемных сварных соединений главных циркуляционных трубопроводов. Е.М. Сафрыгин посетовал, что такой технологии не было 10 лет назад, когда пускался третий энергоблок. Тогда из-за невозможности измерять дефекты пришлось провести огромное количество ненужных ремонтов, как того требовали устаревшие нормативные документы. Это как раз тот случай, который я прокомментировал в начале статьи. Эти ремонтные заварки создали большие проблемы для станции на многие десятилетия. В них в процессе эксплуатации вновь стали развиваться трещины. Мы не раз обращались в разные годы к решению этой проблемы, разрабатывали методики, проводили эксплуатационный контроль.

К моменту начала практических работ по эксплуатационному контролю на АЭС НПЦ «ЭХО+» впервые предложил новый подход в ультразвуковой диагностике, заключающийся в применении трехуровневой технологии (рис. 8). На первом этапе осуществляется поиск дефектов по действующим нормам. На втором этапе происходит измерение реальных размеров и типа дефектов с применением алгоритмов акустической голографии. На третьем этапе эта информация используется для оценки работоспособности объекта с учетом пара-

метров дефектов. Именно этот подход реализован в автоматизированных системах «АВГУР».

Данная технология ультразвукового диагностирования позволила:

- значительно повысить надежность выявления дефектов различного типа за счет более высокой чувствительности контроля;
- минимизировать как «недобраковку», так и «перебраковку» благодаря регистрации всей информации о контроле и возможности детального анализа ее оператором в особо сложных и важных случаях;
- составить базу данных о наличии в сварных швах различного рода допустимых несплошностей (провести паспортизацию швов);
- осуществлять эксплуатацию оборудования с «непроходными» (по действующим нормам) дефектами благодаря возможности оценки ресурса работы сварной конструкции по установленным размерам несплошностей и параметрам напряженного состояния;
- проводить мониторинг за развитием дефектов в процессе эксплуатации объектов.

Прочностной анализ на основании экспертного заключения и принятие решения о допустимости эксплуатации осуществляют специализированные организации (НИКИЭТ, ОКБ ГИДРОПРЕСС, РНЦ «Курчатовский институт», ВНИИАЭС).

Разумеется, в основе предложенной и реализованной технологии лежит возможность измерения размеров дефектов и определения их типа. В этом главное преимущество систем «АВГУР» (рис. 9). Если ранее во всех руководящих документах красной линией проходило требование о недопустимости трещин любого размера, то сегодня концепция эксплуатационного контроля строится на том, что с трещинами объекты могут эксплуатироваться при условии, что известна скорость роста трещины, организован периодический мониторинг АУЗК в измерительном режиме.

Таким образом, эта технология обеспечивает эффективное использование результатов НК в прочностных расчетах по оценке надежности и ресурса контролируемых изделий и постоянное наблюдение за состоянием объекта.

Уже в первые годы применения голографического контроля удалось снизить более чем в 2 раза объем ремонта, благодаря тому что появилась возможность разделять выявляемые дефекты на опасные и неопасные, которые не влияют на работу объекта. А неопасных дефектов было большинство. Как правило, они образовывались еще на стадии изготовления оборудования и в течение всего срока эксплуатации не развивались.

Приведу один показательный пример эффективности применения голографической техноло-

гии контроля. На реакторах РБМК (реакторы большой мощности, каналные) имеется много сварных соединений диаметром 325 мм (примерно 1700 штук на каждом блоке). Причем все швы аустенитные, а их ультразвуковой контроль отсутствовал из-за крупнозернистой структуры.

В то же время при эксплуатации энергоблока в этих швах с внутренней поверхности достаточно часто образуются и растут трещины. Возникла реальная опасность отрыва трубопровода с катастрофическими последствиями.

В 1996 году на одном из блоков стали наблюдаться случаи выхода из строя этих швов по трещинам. Из-за отсутствия контроля и картины дефектности швов пришлось ремонтировать почти все швы, блок простоял в ремонте целый год. Поэтому, когда мы предложили нашу технологию выявления трещин и измерения их размеров, она сразу вызвала большой интерес, и с 1997 года начался масштабный контроль этих швов на всех станциях.

Для оценки погрешности измерения параметров трещин при голографическом контроле был проведен большой цикл работ по сопоставлению результатов контроля с металлографическими исследованиями. На рис. 10 приведены данные по сопоставлению высоты дефектов, измеренных системой «АВГУР» и обнаруженных разрушающим контролем. Из него следует, что погрешность определения высоты дефектов не превышает ± 1 мм, что вполне устраивает эксплуатационщиков для правильного принятия решения о дальнейшей эксплуатации трубопровода. Существенно хуже погрешность при измерении длины дефекта (рис. 11), поскольку в этом направлении не предусматривается голографическое восстановление. На рис. 12 приведены в качестве примера изображения В- и С-типа трещины в свар-

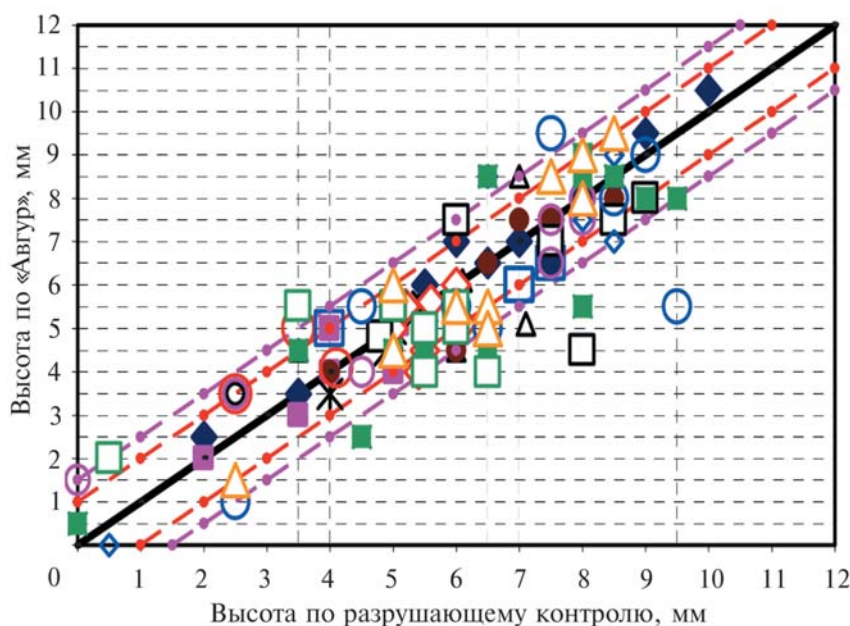


Рис. 10. Высота дефектов в отдельных сечениях, полученная с помощью системы «Авгур» и при разрушающем контроле (металлография, трехточечный изгиб): значки – результаты измерений в отдельных сечениях; черная линия – погрешности, равные нулю; красные пунктирные линии – погрешности, равные ± 1 мм; лиловые пунктирные линии – погрешности, равные $\pm 1,5$ мм

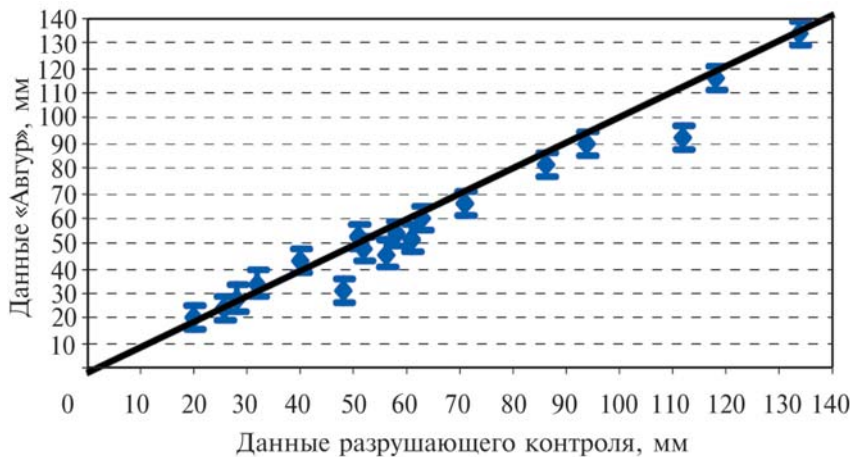


Рис. 11. Результаты сопоставления длины дефектов по данным «АВГУР» с разрушающим контролем (металлография, трехточечный изгиб). Погрешность составила ± 4 мм

ном шве Ду300 и микрошлиф, соответствующий этой трещине.

Базируясь на наших многолетних данных контроля и периодического мониторинга, специалисты по прочности создали эксплуатационные нормы оценки дефектов, в которых впервые допускались сварные швы с трещинами (рис. 13). Зная скорость их роста, в каждый ремонтный

период можно заранее планировать ремонт небольшого количества швов, в которых трещины достигли критического значения. Что и было сделано. Экономический эффект от внедрения новых технологий в атомной энергетике не принято подсчитывать, но можно с уверенностью сказать, что он составляет многие сотни миллионов

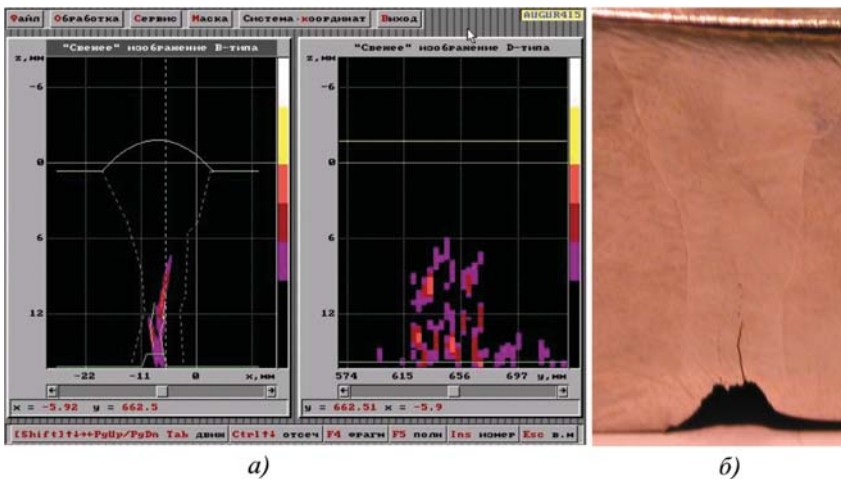


Рис. 12. Сопоставление изображений реального сварного соединения трубопровода Ду300, полученных с использованием системы серии «АВГУР», и металлографии: а – изображения В- и D-типа, полученные в измерительном режиме АУЗК; б – фотография микрошлифа сварного шва в области дефекта

рублей. Сегодня все сварные соединения такого типа постоянно проверяют нашими системами «АВГУР». На сленге станций это называется «проавгурить». На сегодня все сварные соединения «проавгурены» по четыре-пять раз (более 100 тыс. соединений).

На рис. 13 приведены безопасные области эксплуатации сварных соединений (кривые 1–3), которые определяются длиной и высотой трещин. Кривые соответствуют длительности межконтрольного срока эксплуатации с учетом подрастания трещины за этот период времени в длину и глубину.

Новое поколение систем «АВГУР»

В 2003 году прошла приемочные испытания система «АВГУР 5.2», которая сменила «АВГУР 5.2», которая сменила «АВГУР 4.2» и на десятилетие определила наши внедренческие работы. С началом использования системы «АВГУР 5.2» мы вошли в тематику контроля сварных соединений реакторов ВВЭР-440 и ВВЭР-1000. Здесь оказалось непаяное поле задач и проблем. Для многих швов не существовало вообще никакого контроля. Лишь для некоторых швов действовали ручные методики. Швы эти оказались непро-

стые, как правило, аустенитные, большой толщины, многие из них разнородные, с ограниченными поверхностями ввода ультразвука, к тому же криволинейные. До нашего участия в этих работах такие швы считались неконтролепригодными.

Первый же контроль разнородных соединений на реакторе ВВЭР-440, отработавшем тридцать лет, показал наличие огромной трещины высотой в две трети толщины шва и длиной в

половину периметра (рис. 14). Была очевидной опасность катастрофического отрыва трубопровода диаметром 1100 мм. Станционные работники не хотели верить, что такое возможно, долго не решались на ремонт, но позже вскрыли шов, провели металлографические исследования, и все подтвердилось. Доверие станций к нашим разработкам контроля возросло многократно. Вообще, с недоверием к результатам разработок и контроля мы сталкивались очень часто, особенно вначале, и каждый раз приходилось доказывать достоверность наших данных путем вскрытия и металлографии.

В 2003–2013 годах мы разработали около двадцати методик, охватывающих основные сварные соединения реакторов ВВЭР. Почему так много? Дело в том, что в атомной отрасли существует непреложное правило: не допускают контроля новым оборудованием, если нет аттестованной методики применительно именно к данному шву, а оборудование не прошло сертификацию в Госстандарте. Недопустимо использование универсальных методик, слишком большое значение придается качеству контроля каждого

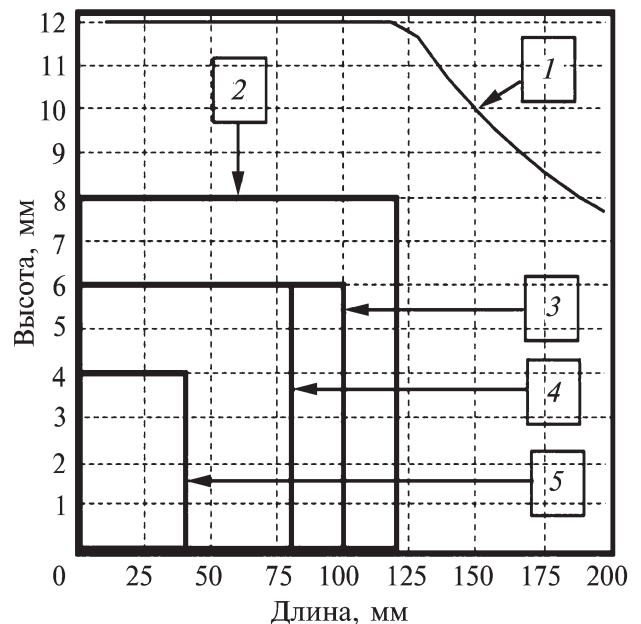


Рис. 13. Диаграмма допустимых размеров дефектов: 1 – диаграмма предельных допустимых дефектов; 2 – область, безопасная для эксплуатации на конец срока оценки; 3 – область, безопасная для эксплуатации на 1 год; 4 – область, безопасная для эксплуатации на 2 года; 5 – область, безопасная для эксплуатации 4 года

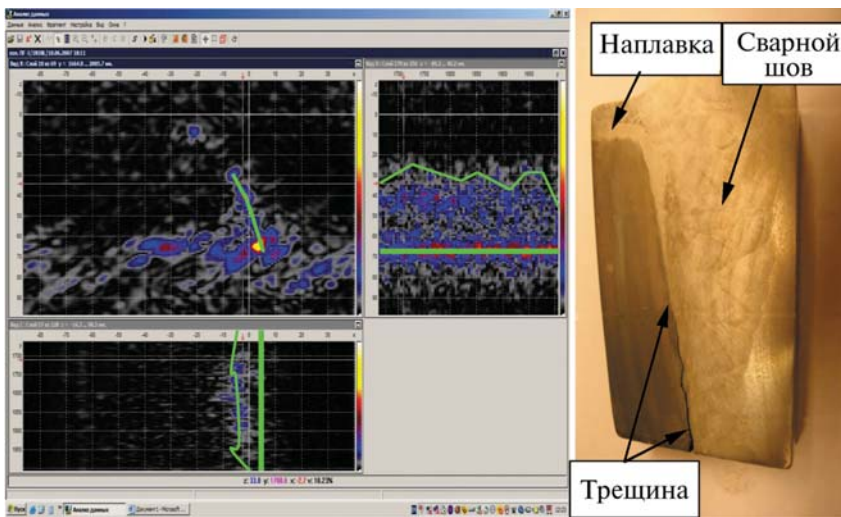


Рис. 14. Когерентное изображение B-, C- и D-типа плоскостного дефекта в разнородном сварном соединении Ду1100 реактора ВВЭР-440, полученное по данным измерительного контроля с использованием продольных волн: пунктирные линии отмечают трещину; справа — микрошлиф сварного соединения

шва. Причем при каждой аттестации новой методики требуется проводить испытания на образцах с искусственными и реалистичными дефектами. Изготовление образцов — также забота и головная боль разработчика. В развитых странах существуют специализированные независимые валидационные центры, оснащенные парками образцов на все случаи жизни. Им передаются методики и оборудование, и они проводят экспертизу и выдают сертификат о возможности применения. К сожалению, у нас ничего подобного нет, разработчик сам и швец, и жнец, и на дуде игрец.

Постепенно новая технология начала проникать и в другие отрасли. Так, например, на нефтебазе Шисхарис (дочернее предприятие ПАО «Транснефть» в Новороссийске) в сварном шве диаметром 1200 мм экспортного трубопровода была обнаружена трещина высотой в одну треть сечения (рис. 15). Никакими другими методами она не выявлялась. Преодолев первоначальное недоверие местных специалистов, мы все же получили добро от руководства головной компании на вскрытие и ремонт этого

участка трубопровода. Металлография вырезанного темплета показала хорошее совпадение. Через непродолжительное время эта трещина могла бы привести к катастрофе. После этого случая было принято решение проверить все сварные соединения.

Похожая ситуация сложилась в одной дочерней компании ПАО «Газпром». На нескольких компрессорных станциях (КС) при плановом контроле было забраковано порядка 400 сварных соединений. Ремонт их потребовал бы выключения на длительный период нескольких КС из сети экспортных поставок газа. Применение нами в 2003 — 2004 годах АУЗК системами «АВГУР» с последующими прочностными

расчетами показал, что ремонт потребовался всего 20 соединениям. Во всех остальных наблюдались отражатели, либо не являющиеся дефектами, либо это были дефекты, тип и размеры которых не представляли угрозы для работоспособности конструкции.

Одна из полезных разработок, часто используемых в ПАО «Газпром», — это система «АВГУР-Т», предназначенная для контроля тройников сварных с накладками (рис. 16). В ней впервые применена трехмерная голография, позволившая сфокусировать луч на расстоянии до 1 м, что обеспечило обнаружение и измерение дефектов в тройниках под накладками. Задача контроля тройников весьма актуальна, поскольку именно поднакладочный шов является слабым узлом и к тому же ранее был неконтролепригоден. А таких тройников в эксплуатации более 40 тысяч. Система «АВГУР-Т» включена в программу оснащения всех дочерних предприятий ПАО «Газпром».

На вопрос, для чего применяется ультразвуковая автоматизированная голография, можно ответить следующее.

Применение ультразвуковой автоматизированной голографии позволило решить давнюю проблему УЗК — измерять реальные дефекты, осуществить переход от дефектоскопии к дефектометрии, которая открыла много новых возможностей и приложений.

С помощью предложенной новой технологии диагностики



Рис. 15. Контроль системой «АВГУР» на нефтебазе Шисхарис, 2002 год



Рис. 16. Автоматизированный голографический контроль сварных соединений тройников с накладками

ЧАСТЬ 3. УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ДЕФЕКТОМЕТРИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ФАЗИРОВАННЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК

Двухтысячные годы в мире неразрушающего контроля ознаменовались быстрым развитием направления, связанного с применением фазированных антенных решеток (ФАР). Многие уважаемые компании предложили рынку приборы на основе ФР-технологии. Мне показался перспективным этот вектор развития средств контроля. Наши ведущие специалисты поначалу не поддержали покупку прибора, говорили, что у нас есть система «АВГУР» – более мощное средство, чем ФР. Тем не менее я настоял на приобретении в 2007 году прибора X-32 компании Harfang. Это стало поворотной вехой в развитии «ЭХО+».

Детальное изучение прибора и в целом технологии ФР показало, что перед системой «АВГУР 5.2» у нее есть как минимум два преимущества. Первое: за счет качания луча по глубине отпадает необходимость сканирования по одной координате, тем самым повышается производительность контроля. И второе: мгновенная обработка, результаты выводятся сразу на экран, что также повышает производительность. Зато обнаружилось множество недостатков и проблем. Это и ограничения в применении для толщин свыше 50 мм, и фокусировка изображения только по одной линии, и наличие ложных изображений, усложняющих расшифровку, и проблемы встраивания приборов в автоматические системы контроля. Нельзя забывать, что в России на то время ни в одной отрасли не было разработано ни одной методики, регламентирующей применение приборов. К тому же их стоимость зашкали-

объектов повышенной опасности, заключающейся в трехуровневом контроле с измерением реальных размеров дефектов, можно проводить оценку состояния эксплуатируемых объектов по их фактическому состоянию и выйти на управление остаточным ресурсом.

Получив возможность измерять реальные размеры дефектов, специалисты по прочности начали работы по созданию эксплуатационных норм на диагностику объектов. Наш опыт показывает, что ультразвуковая дефектометрия и наличие эксплуатационных норм сокращают объем ремонтных работ не менее чем в 10 раз [3, 4]. В то же время повышается эксплуатационная надежность объектов, поскольку к эксплуатации не допускаются изделия с трещинами, превысившими критические размеры.

вала за 100 тыс. дол. Это обстоятельство существенно тормозило применение в общем-то прогрессивной технологии ФАР, хотя на все АЭС централизованно было поставлено по два прибора Omniscan.

После детального изучения на практике технологии и приборов ФАР у наших ученых появилось множество идей, как улучшить технологию и создать более совершенное оборудование для автоматизированного УЗК. Был предложен и разработан новый алгоритм под названием C-SAFT, который в дальнейшем трансформировался в 3D-C-SAFT. Строго говоря, к этому времени уже появились работы российских ученых А.А. Самокрутова и В.Г. Шевальдыкина (компания «Акустические контрольные системы»), и даже выпускается прибор А1550 «Интровизор». Но мы пошли дальше и впервые разработали автоматизированную систему «АВГУР-АРТ». Именно в автоматизированном режиме в полной мере проявляются все преимущества технологии, которая, кстати, названа «Цифровая фокусирующая антенна» (ЦФА) [5].

Не вдаваясь в физику и тонкости, выделим преимущества ЦФА. Во-первых, создается такое акустическое поле в изделии, в котором формируется слабо расходящийся узкий луч шириной менее 1 мм, что обеспечивает высокую разрешающую способность – такую же, как при голографии. При этом чем больше толщина изделия, тем более значимо это преимущество. Благодаря формированию узкого пучка лучей чувствительность контро-



Рис. 17. Система «АВГУР-ТФ»

ля повысилась примерно в 2 раза, появилась возможность контролировать изделия большой толщины (300 мм и более) с измерением размеров дефектов от 1 мм.

Во-вторых, для всех когерентных методов визуализации характерно наряду с основным изображением наличие ложных изображений (фантомов), связанных с другими модами волн, неизбежно возникающих на дефекте. Фантомы затрудняют анализ результатов и препятствуют автоматизации анализа. В свое время мы прилагали немалые усилия для решения этой проблемы, приглашали ученых – специалистов по распознаванию изображений, но результата достичь не удалось именно из-за многообразия фантомов. Так вот, технология ЦФА позволяет эти самые фантомы обратить во благо: проанализировать отдельно изображения на разных акустических схемах и объединить их. Тогда все изображения дефектов, полученные любым ходом лучей, превратятся в одно единственное изображение без фантомов. А далее уже можно автоматизировать и анализ, и получение протокола контроля.

В-третьих, при формировании правильного изображения большую роль играет профиль внутренней поверхности справа и слева от сварного шва, который далеко не всегда совпадает с чертежом и заранее неизвестен. Это незнание приводит к размыванию изображения и увеличению погрешности измерения размеров дефектов. Технология ЦФА позволяет при размещении антенных решеток с двух сторон шва восстановить профиль внутренней поверхности и с его учетом получить новое изображение, в котором ошибка будет сведена к нулю. Кстати, эта возможность легла в основу предложенной нами технологии измерения толщины и профиля внутренней поверхности по всему периметру сварного соединения, что дает дополнительную информацию о его качестве.

Есть еще ряд менее значимых преимуществ технологии ЦФА (более высокое отношение сигнал/шум при контроле аустенитных сварных швов, безэталонное и одновременное измерение толщины и скорости продольных и поперечных волн). Все эти преимущества как раз и удалось реализовать в новой системе «АВГУР-АРТ».

В 2010 году сложилась благоприятная ситуация по форсированному развитию приборов и технологий с использованием ФР применительно к контролю сварных соединений на АЭС. С одной стороны, в концерне «Росэнергоатом» и на АЭС понимали, что применение дефектоскопов ФР перспективно, и даже закупили по два прибора на все АЭС. Но отсутствие разрешенных методик не позволяло их применять. С другой стороны, мы накопили достаточно большой опыт использования дефектоскопов ФР. Факультативно мы несколько лет применяли их при контроле. Я вышел в концерн РЭА с предложением создать комплексную программу развития этого направления. Программа была создана, утверждена на уровне руководства концерна и финансировалась четыре года. Благодаря ей нам удалось разработать ту самую базовую систему «АВГУР-АРТ», которая на несколько лет стала основным нашим продуктом; благодаря этой программе были созданы и разрешены к применению пятнадцать методик, идет поставка этих систем на все АЭС, практически на все наиболее ответственные сварные соединения реакторных установок типа ВВЭР. Наш отдел неразрушающего контроля также был оснащен системами «АВГУР-АРТ» и успешно применяет их в эксплуатационном контроле на АЭС. Кроме того, разработано 18 методик контроля объектов АЭС, охватывающих практически все сварные соединения первого и второго контуров. Все эти методики предполагают использование как в режиме классической ФР, так и в режиме ЦФА. Главной особенностью их как раз и является возможность измерения размеров дефектов.

Мы выполнили две разработки для предприятий, производящих изделия большой толщины, в частности для ОАО «Ижорские заводы», выпускающего сосуды химических реакторов диаметром до 5,5 м, длиной до 40 м и толщиной 300 мм и более.

Одна из последних наших поставок состоялась на Ленинградский металлический завод (ЛМЗ), готовящийся выпускать сварные роторы турбин новой конструкции с большой толщиной сварных швов – до 200 мм. С этой целью мы переработали систему «АВГУР-АРТ» таким образом, чтобы она поддерживала контроль одновременно четырьмя антенными решетками, две из которых предназначены для контроля продольных, а две другие – поперечных дефектов.

Расскажу о нашем вкладе в развитие технологии TOFD. За рубежом нашел широкое применение для контроля сварных швов так называемый TOFD (Time of Flight Diffraction – дифракционно-временной, или в буквальном переводе с английского «время-пролетный» метод) – разновидность ультразвукового метода контроля. В России TOFD совершенно не представлен, нет ни методик, ни аппаратуры. Мы взялись восполнить этот пробел, разработали и поставили систему на базе «АВГУР-Т», реализующую технологию применительно к большим толщинам – 300 мм и более. Преимущество технологии TOFD состоит в высокой производительности контроля (отсутствие одной координаты сканирования), а также в возможности измерения высоты дефектов с достаточно высокой точностью. Но имеется и серьезный недостаток: трудно расшифровывать результаты, требуются высококвалифицированные специалисты. Еще один недостаток заключается в том, что невозможно определить координаты обнаруживаемых дефектов в сварных швах относительно оси сварного шва. Нельзя определить, где находится дефект: слева, в середине или справа. Решение этой задачи нами запатентовано. Эта технология требует высококачественного широкополосного электроакустического тракта. Такая аппаратура была создана в варианте отдельного блока, с возможностью подключения до четырех пар ПЭП для контроля изделий большой толщины. Несколько поставок осуществлено на заводы, выпускающие нефтехимические сосуды большой толщины (до 300 мм).

Шло время, мы продолжали заниматься новыми разработками. И вот наконец в 2017 году у нас появилась совершенно новая система «АВГУР-ТФ» (рис. 17). Она представляет собой двоянный блок, в котором реализованы одновременно три самые современные технологии контроля, а именно: технология фазированных

антенных решеток размером 64×64 независимых канала с возможностью подключения четырех антенных решеток. Вторая технология базируется на алгоритме цифровой фокусировки антенны, в которой последовательно один излучает, а остальные принимают с одновременным сложением всех А-сканов с учетом фазы. Третья технология использует «время-пролетный метод» (TOFD-метод). Все три технологии удачно дополняют друг друга, и в результате мы получаем полную информацию о качестве сварного шва. Наша разработка оказалась единственной на российском рынке подобного класса системой, потеснившей импортные очень дорогие системы, такие как «Ротоскан».

Система «АВГУР-ТФ» стала первой отечественной системой для автоматизированного контроля, в которой реализовано сразу несколько методов контроля: ФР в режимах секторного/линейного контроля с фокусировкой на постоянную глубину по вертикальной прямой, по сектору окружности, по отрезку произвольной прямой, зональная фокусировка, ЦФА, ЦФА-Х, ЦФА-У, ЦФА-ХУ, Multi-ЦФА, TOFD и АВИК (автоматизированный визуально-измерительный контроль). Испытания системы «АВГУР-ТФ» и опыт ее применения для АУЗК сварных соединений показали ее высокую эффективность по обнаружению и определению параметров дефектов, что достигается применением комбинации таких методов, как ФР, ЦФА, TOFD. Функциональные возможности системы, включая ее программное обеспечение, позволяют эффективно, в сжатые сроки решать задачи разработки методик контроля сварных соединений со сложной геометрией и проводить сам контроль.

Радиография или ультразвук: что лучше

Не могу не отметить еще одно достижение компании, которое базируется на высокой разрешающей способности наших систем. Дело вот в чем. Из-за плохой разрешающей способности традиционного УЗК на ответственные узлы, как правило, конструкторы назначают помимо УЗК еще и радиографический контроль (РГ) либо только его. С помощью РГ можно очень точно измерить реальные размеры дефектов. В то же время разрешающая способность систем «АВГУР» уже приближается к параметрам РГ, особенно для толщин более 20 мм, а для толщин более 80 мм превосходит его. Учитывая другие преимущества такого контроля (выявление трещин, высокая чувствительность, производительность, безопасность, экономичность, контроль объектов с высоким радиационным фоном), АУЗК становится прямым конкурентом РГК.

При аттестации методик полученные экспериментальные данные позволяют сделать следующие важные выводы:

- радиографический контроль обеспечивает меньшую чувствительность, чем АУЗК с дефектометрией;
- подтверждено наличие всех выявленных методом АУЗК несплошностей (не зафиксирована перебраковка);
- выявляются несплошности эквивалентной площадью менее 1 мм²;
- погрешность определения высоты методом АУЗК не превысила ±2 мм.

Нами аттестовано пять методик, заменяющих РГ на АУЗК для сварных швов диаметром от 159 до 720 мм, которые успешно применяются на всех АЭС.

У нас уже имеется опыт замены РГ на АУЗК в других отраслях. Приведу пример. К нам обратилась компания «Волгонефтехиммонтаж», возводившая в Кстово Нижегородской области завод «Лукойл-Нижегороднефтеоргсинтез». На объекте монтировалось большое количество трубопроводов диаметром 400–700 мм со сварными швами аустенитного класса, которые ранее принципиально не контролировались УЗК, поэтому предписан был контроль РГ источником ионизирующего излучения. На контроль каждого сварного шва уходит четыре с половиной часа, при этом требуется эвакуация персонала из зоны контроля. Мы разработали методику, провели приемочные испытания со вскрытием, металлографией и сопоставлением результатов, которые оказались положительными, и Ростехнадзор разрешил замену РГ на АУЗК. Мы проконтролировали сто швов за пятнадцать смен, при этом монтаж объекта не прерывался. Для РГ потребовалось бы пятьдесят пять смен с остановкой монтажа и срывом сроков пуска объекта. Сегодня мы уже имеем несколько методик для атомных станций, разрешенных для замены РГ. Наше глубокое убеждение: когерентный АУЗК для сварных соединений любого типа и диаметром 50 мм и более и толщиной 15 мм и более для эксплуатационного контроля значительно предпочтительнее, чем радиография.

Еще более масштабная внедренческая работа по замене радиографии на АУЗК аппаратурой «АВГУР-Т» была выполнена в 2016 году на предприятии Нижнекамскнефтехим. К этому времени у нас уже была разработана и утверждена Ростехнадзором методика АУЗК аустенитных сварных соединений большой толщины. Было продиагностировано более 1000 сварных соединений. На сегодняшний день это единственная и весьма эффективная методика контроля аустенитных сварных соединений. Производительность контроля составляет 15–20 погонных метров швов за смену, что в 4 раза выше, чем радиографией.

Ручной ФР-дефектоскоп

На протяжении всех 30 лет существования компании основное внимание мы уделяли разработкам автоматизированных комплексов, предназначенных для диагностики сварных швов и основного металла объектов повышенной опасности. Главное требование, предъявляемое к ним, — возможность не только выявлять дефекты, но и измерять их размеры. Эта стратегия всегда имела коммерческий и научный успех. Все больше отраслей народного хозяйства стали обращаться к использованию измерительного АУЗК, разрабатывать эксплуатационные нормы. Примером могут служить принятые в 2016 году нормы и правила НП-084-15 в атомной энергетике, впервые регламентирующие эксплуатационный контроль, основанный на измерении реальных параметров дефектов. Именно наши разработки дали толчок к созданию подобных документов. Создавая 30 лет назад компанию, я и мечтал о таком развитии ультразвуковой дефектометрии. Но, к сожалению, этот процесс пошел гораздо медленнее, чем я прогнозировал в начале пути. На то были свои причины, и главные — консерватизм руководителей отраслей, недостаточная подготовленность нормативной базы.



Рис. 18. Внешний вид дефектоскопа «АВГУР-АРТ Р»

Не надо быть провидцем, чтобы увидеть, что в последние 5–7 лет во всем мире взрывным образом стали появляться на рынке ручные приборы, основанные на ФР-технологии. Это показало посещение нами двух международных выставок: всемирной в 2016 году в Мюнхене и европейской в 2018 году в Гетеборге. По нашим подсчетам, не менее 50 мировых компаний сегодня выпускают ФР-дефектоскопы. В последние годы появилось несколько российских разработок таких компаний, как «Кропус», АКС, «Вотум». Тем не менее лидерами на российском рынке продаж стали импортные дефектоскопы «Харфанг VEON» («Сона-тест») и «Омнискан МХ-2» («Олимпус»). И, не-

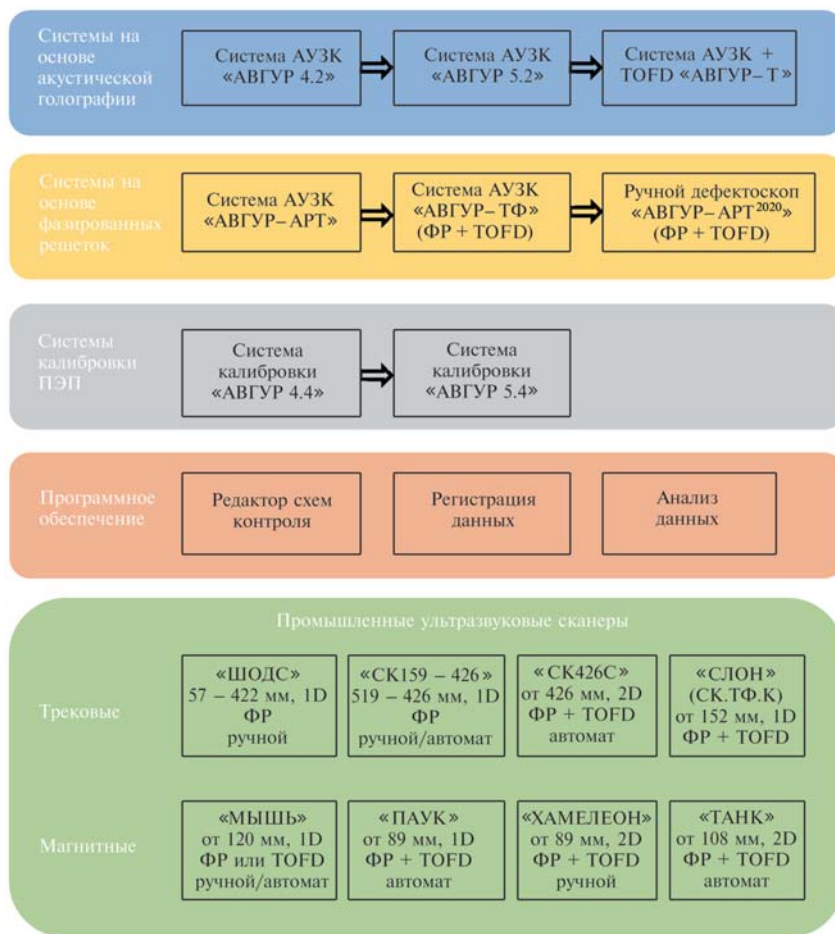


Рис. 19. Обобщенная схема продукции ООО «НПЦ «ЭХО+»

смотря на высокую цену (порядка 6 млн руб.), они десятками штук поставляются в Россию. В России в последние годы проводится политика импортозамещения, направленная на снижение зависимости промышленности от импортных поставок. Имея большой опыт в создании автоматизированных систем с применением ФР, а также в соответствии с направлением на импортозамещение, мы разработали свой ручной ФР-дефектоскоп «АВГУР-АРТ^Р» (рис. 18). В нем максимально использованы самые современные решения, накопленные в России и за рубежом. Этот дефектоскоп, по сути, включает в себя три дефектоскопа, в том числе: ФР-дефектоскоп, ЦФА-дефектоскоп и TOFD-дефектоскоп. Особен-

ностью его является то, что он может работать одновременно во всех этих режимах, что существенно повышает достоверность контроля.

Основные отличительные характеристики дефектоскопа «АВГУР-АРТ^Р»:

- большой экран 13,3", позволяющий видеть одновременно до 8 картинок;
- количество каналов прибора от 32×32 до 64×128;
- наличие программы, реализующей излучение и обработку сложных сигналов, что позволяет многократно повысить чувствительность контроля;
- работа с широким спектром сканеров, поскольку прибор поддерживает три энкодера.

Немаловажно, что цена дефектоскопа «АВГУР-АРТ^Р» бу-

дет существенно ниже аналогичных импортных приборов.

Продукция нашей компании

На рис. 19 схематично представлена актуальная продукция компании:

- системы автоматизированного контроля с применением акустической голографии («АВГУР 5.2» и «АВГУР-Т»), одним из режимов работы системы «АВГУР-Т» является контроль поднакладочных сварных соединений в тройниках магистральных газопроводов, другой режим – реализация технологии TOFD;
- дефектоскопы с поддержкой технологии фазированных решеток и цифровой фокусировки – «АВГУР-АРТ»; первые такие дефектоскопы выполнялись на базе импортной многоканальной электроники, но в настоящее время мы целиком перешли на платы, разработанные в ООО «НПЦ «ЭХО+»; флагманским прибором становится дефектоскоп «АВГУР-АРТ^Р»;
- системы калибровки пьезоэлектрических преобразователей «АВГУР 4.4» и «АВГУР 5.4», которые приобретаются метрологическими центрами по всей России от Калининграда до Хабаровска;
- программное обеспечение всех дефектоскопов и систем, которое стандартизовано и делится на три основных модуля: «Редактор схем контроля», «Регистрация данных» и «Анализ данных»;
- промышленные ультразвуковые сканеры, реализующие автоматизацию и механизацию контроля, которые подразделяются на ручные и автоматизированные, трековые и магнитные; с помощью этих сканеров проводится контроль от трубок 57 мм до корпуса парогенератора диаметром 4,5 м.

Услуги по контролю

Как я уже писал, начиная с 1996 года наша компания одновременно с разработками стала осуществлять эксплуатационный контроль на АЭС нашими системами. Поначалу это были системы «АВГУР 4.2», и работы проводились на наиболее ответственных трубопроводах. Эта работа оказалась весьма полезной для станций, поскольку позволила резко уменьшить объемы ремонта и, соответственно, время простоя энергоблока и повысить эксплуатационную надежность именно благодаря своевременному обнаружению и ремонту сварных соединений с опасными трещинами. Эта наша работа хорошо оплачивалась, что позволяло компании не только существовать, но и активно развиваться, создавая новые виды продукции. Через несколько лет в рамках компании был организован отдел неразрушающих методов контроля, который профессионально занимался только контролем и только нашими системами. Осуществляемая при этом обратная связь между контролерами и разработчиками оказалась очень эффективной для совершенствования продукции и подпитки новыми идеями. Благодаря такой организации деятельности компании нам удалось создать четыре поколения АВГУРов, постоянно расширяя область их применения. Именно благодаря высоким метрологическим характеристикам в области ультразвуковой дефектометрии были разработаны многочисленные методики по замене радиографического контроля на когерентный АУЗК, что позволило начать работы по созданию эксплуатационных норм на контроль промышленно опасных объектов.

Начиная с 2010 года компания проводит работы по АУЗК сварных швов объектов нефте-

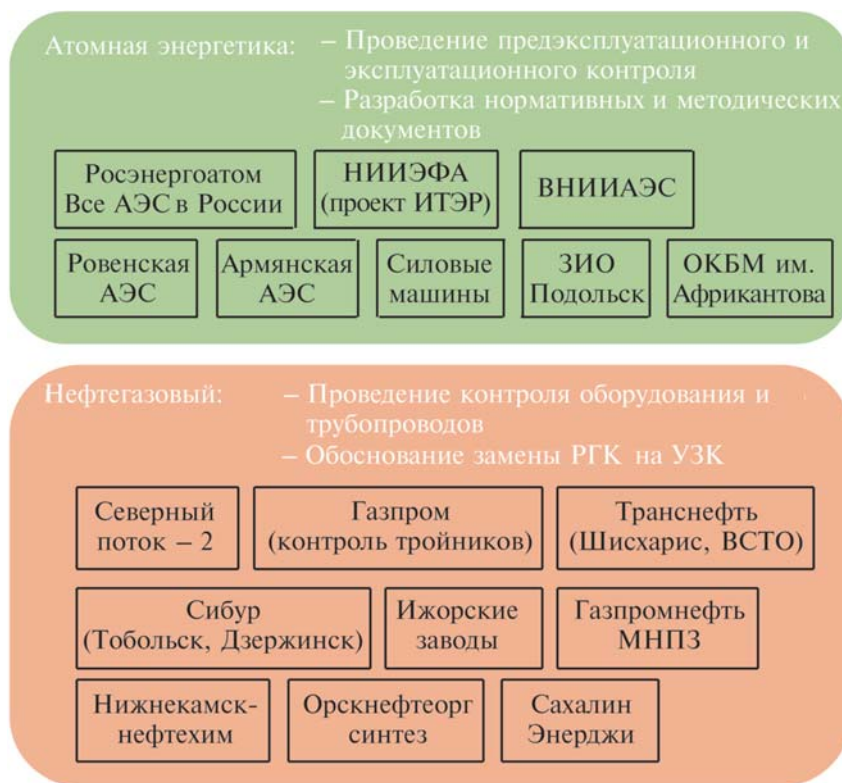


Рис. 20. Услуги ООО «НПЦ «ЭХО+». Отрасли и заказчики

химии. Эти работы оказались не менее востребованными благодаря большому количеству преимуществ перед радиографическим контролем. Особенно эти преимущества наблюдаются при контроле трубопроводов большой толщины (40 мм и более), к тому же выполненных из аустенитных материалов. С этой целью нами разработаны две методики, используемые на объектах нефтехимии.

Одна из особенностей ООО «НПЦ «ЭХО+» заключается в том, что наши специалисты сами работают с системами нашей разработки и первыми налаживают обратную связь с разработчиками. У нас принято за правило, чтобы и разработчики сами поучаствовали в проведении контроля тем оборудованием, которое они создали.

На рис. 20 схематично представлены две основные отрасли,

в которых мы работаем, и самые крупные заказчики.

Библиографический список

1. **Методы** акустического контроля металлов / под ред. Н.П. Алешина. М.: Машиностроение, 1990. 456 с.
2. **Вопилкин А.Х.** Без истории нет будущего. М.: ИД «Спектр», 2019, 378 с.
3. **Автоматизированный** ультразвуковой контроль объектов повышенной опасности: сб. ст. / под ред. А.Х. Вопилкина. СПб.: Свен, 2010. 64 с.
4. **Ультразвуковая дефектометрия** металлов с применением голографических методов / под ред. А.Х. Вопилкина. М.: Машиностроение, 2008. 268 с.
5. **Ультразвуковая дефектометрия, 20 лет:** сб. ст. / под ред. А.Х. Вопилкина. СПб.: Свен, 2015. 140 с.