

---

## Оценка коррозионного состояния объектов на участках, недоступных для выполнения толщинометрии традиционными методами



**Пасси Гарри**

Генеральный директор и научный руководитель фирмы Sonotron NDT, доктор наук, профессор, III уровень в пяти дисциплинах НК (UT, ET, MPI, MIA, RT)

Весьма сложно представить какой-либо объект инфраструктуры, неподверженный коррозии в процессе эксплуатации. Предотвращение коррозии и ее последствий поглощает огромные средства, например, только в США на профилактику коррозии расходуется 276 миллиардов долларов в год [1, 2]. Для обнаружения коррозии массово применяется ультразвуковая эхо-импульсная толщинометрия с поточечным или сплошным сканированием как вручную, так и с использованием механических сканеров — кроулеров. При этом обеспечивается измерение остаточной толщины объекта непосредственно в местах установки преобразователя, и результат измерения представляется наиболее приемлемым образом — в абсолютных единицах. Однако поверхность участка объекта контроля, где необходимо оценить коррозионное состояние, не всегда доступна для сканирования по ней без временного вывода объекта из эксплуатации или других непроизводственных операций, которые экономически невыгодны, а иногда и сопряжены с реальным риском как для самого объекта, так и для оператора. В связи с этим существуют и непрерывно совершенствуются технологии, позволяющие оценить степень коррозионного повреждения объекта без сканирования непосредственно над наблюдаемыми участками.

### Технология LRGWI

Известно, что степень коррозии опорных плит, расположенных по внешнему периметру сварного днища, предопределяет объем работ по техническо-

му обслуживанию и ремонту наземного резервуара при периодическом (один раз в несколько лет) выводе его из эксплуатации. Визуальный контроль и ультразвуковая толщинометрия опорных плит производятся изнутри немедленно после удаления продукта и первичной очистки. При этом известны достаточно частые инциденты, когда при плановом обслуживании некоторого количества выведенных из эксплуатации резервуаров на территории топливохранилища внезапно происходит утечка продукта из одной или нескольких заполненных продуктом соседних емкостей, обслуживание которых запланировано на более поздние сроки. Огромные убытки, которые несут при этом компании, эксплуатирующие резервуары, предопределили потребность рынка в создании технологии мониторинга коррозионного состояния опорных плит сварных днищ емкостей, заполненных продуктом, снаружи, что обеспечило бы возможность объективного планирования сроков вывода резервуаров из эксплуатации и объема работ по их обслуживанию и ремонту.

Технология LRGWI (**Long Range Guided Waves Inspection**), известная также под коммерческими названиями LORUS [3–5] и FLOORMAP [6],

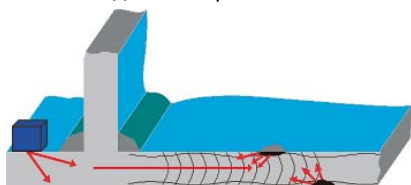


Рис. 1. Схематическое представление выявления коррозионных дефектов в опорной плите днища наземного резервуара с использованием технологии LRGWI



Рис. 2. Спектральная функция сигналов при использовании технологии LRGWI характеризуется несколькими максимумами, обусловленными свойствами объекта контроля

позволяет обнаруживать коррозионные дефекты на расстоянии от нескольких сантиметров до 2 м при установке преобразователя на небольшой выступ (5–10 см) опорной плиты с внешней стороны стенки резервуара (рис. 1). Признаком обнаружения дефекта является прием эхо-сигнала, превышающего заранее заданный пороговый уровень. В основе технологии LRGWI лежит применение ультразвукового пучка, который распространяется между двумя параллельными стенками, претерпевая многократные отражения. За счет конструктивных особенностей преобразователя и режима генерации ширина и пространственная протяженность пучка пре-

вышают толщину объекта контроля уже непосредственно под контактной площадкой преобразователя. В результате обеспечиваются необходимые условия для интерференции, при которой пространство между стенками выступает в роли волновода для проходящего через него ультразвукового импульса. В определенной степени такой механизм генерации сходен с возбуждением нормальных волн, но отличается тем, что акустический сигнал на контактной площадке преобразователя изначально широкополосен, а потому возникновение волноводного эффекта не критично к толщине объекта контроля в необходимом диапазоне. Данное положение наглядно иллюстрируется рис. 2, где представлены типичный импульс, зарегистрированный широкополосным приемником, расположенным на плите на расстоянии 1 м от места излучения LRGWI-преобразователем, и его спектральная функция с четко различаемым рядом максимумов. Спектральная функция импульса на приемном преобразователе характеризует условия его генерации и распространения, что в значительной степени зависит от реального износа контролируемого листа, наличия и качества окраски и /или покрытия, степени межкристаллитной коррозии и т. п. Поэтому для обеспечения прозвучивания реальных объектов во всех возможных условиях их эксплуатации следует обеспечить определенную избыточность, распределив относительно высокую энергию излучения в достаточно широком диапазоне частот.

При контроле опорных плит, расположенных по внешнему периметру сварного днища резервуара, максимально необходимая дальность контроля не превышает 1,5–2 м (расстояние от края внешнего выступа плиты до ее противоположного края внутри резервуара, где расположен нахлесточный сварной шов). Настройка чувствительности осуществляется на специально изготовленных образцах, выполненных из того же материала, что и контролируемый объект, и имеющих сходную степень износа, окраску и т. п. В качестве эталонного отражателя применяются засверловки со сферическим или коническим дном, наиболее соответствующие по отражательным свойствам питтингу (точечным коррозионным повреждениям); основные параметры засверловки — глубина и диаметр на поверхности листа (рис. 3).

Помимо мощности излучения и усиления приемного тракта при калибровке также определяются скорость распространения ультразвукового импульса в объекте и приведенная задержка преобразователя.

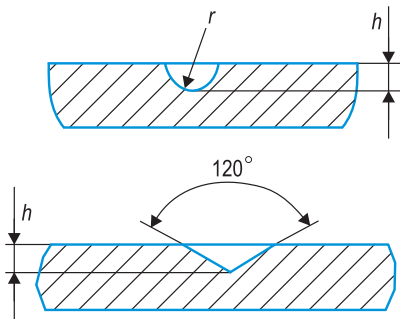


Рис. 3. Засверловки, применяемые при настройке чувствительности контроля с использованием технологии LRGWI:  $r$  — радиус;  $h$  — глубина

периметру емкости в день на один прибор, выполнение контроля традиционным способом, когда ограничиваются лишь наблюдением за А-скан индикациями и принимают решение на месте, практически невозможно даже при идеальном акустическом контакте. Визуализация карты объекта контроля (СВ-скан) в реальном времени при непрерывной записи всех А-скан реализаций является при этом очевидным и единственно возможным решением. Простейшим является линейное сканирование вдоль стенки резервуара с постоянной скоростью (синхронная запись) или с использованием одноосного сканера. Однако на практике сплошность контроля не может быть обеспечена таким образом из-за наличия на внешнем выступе опорной плиты значительного количества естественных грубых повреждений, загрязнений и т. п. Поэтому используется комбинированное линейно-вращательное сканирование с отслеживанием двух координат и разворотов преобразователя. Пример немеханической реализации слежения за координатами и углом разворота преобразователя на выступе опорной плиты с использованием акустического локатора приборов серии ISONIC 2001 представлен на рис. 4. На рис. 5 показан экран прибора в процессе сканирования и анализа результатов контроля\*.

Консистентная регистрация результатов сканирования при варьировании углом разворота преобразователя позволяет отстроиться от

Для компенсации потерь при распространении импульса в объекте контроля настраивают DAC (*Distance Amplitude Curve*) — кривую «амплитуда — расстояние», что осуществляется за счет озвучивания эталонного отражателя последовательно с различных расстояний от 5 до 150–200 см с шагом 5–10 см.

В связи со значительной длительностью развертки и типичными объемами сканирования, составляющими сотни метров по

\* Динамическая иллюстрация реализации технологии LRGWI с применением линейного и комбинированного линейно-вращательного сканирования (видео файлы) доступна в Интернете: <http://www.sonotronndt.com/Movies/Floormap1.avi>; <http://.../Floormap2.avi>; <http://.../Floormap3.avi>; <http://.../floormap.avi> (прим. автора).



Рис. 4. Местоположение и разворот на выступе опорной плиты преобразователя LRGWI, оснащенного двумя излучателями ультразвука в воздух, отслеживаются двумя приемниками, расположенными непосредственно на стенке резервуара

помех, которые обусловлены мощными эхо-сигналами, отраженными из области приварки стенки резервуара к опорной плите, и выявлять за счет этого коррозионные повреждения, расположенные под стенкой и непосредственно за ней, сводя мертвую зону практически к нулю. Следует также отметить, что весьма вероятно наличие стыковых сварных швов в самой опорной плите, так как при техническом обслуживании резервуара участки, недопустимо поврежденные коррозией, вырезаются и вместо них ввариваются новые сегменты. Распознавание таких сегментов и деление изображений дефектов и сварных швов внутри опорной плиты также осуществляется за счет вращения преобразователя и соответствующей регистрации.

Технология LRGWI применима не только для контроля опорных плит днища наземного резервуара, но и для ряда других объектов. Применяя данную технологию, выявляют коррозионные повреждения и стресс-коррозию в стенках труб, покрытых изоляцией или расположенных под

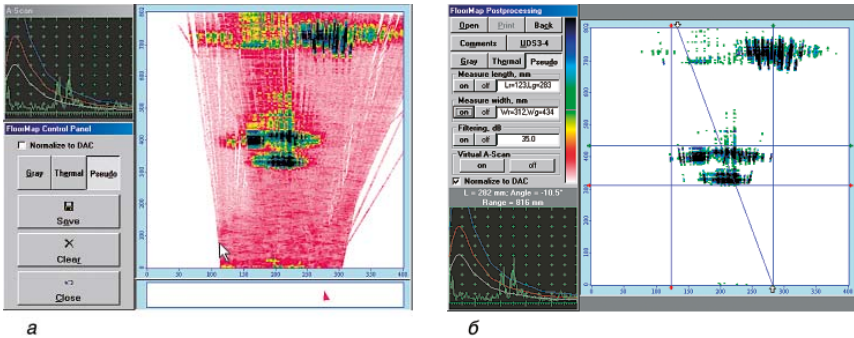


Рис. 5. Типичный экран прибора ISONIC 2001 при реализации линейно-вращательного сканирования в процессе контроля (а) и на этапе анализа его результатов (б)



Рис. 6. Образец, используемый для настройки чувствительности при контроле подземных цилиндрических резервуаров для хранения сжиженного газа (а) и процесс сканирования резервуара (б)

землей, а также прилегающих к металлическим или бетонным опорам, в стенках подземных резервуаров, в обшивке судов, покрытой эпоксидным компаундом или композитным изоляционным материалом и т. п. Во всех случаях лишь незначительная часть поверхности объекта контроля освобождается от изоляции, обеспечивая возможность сканирования преобразователем LRGWI для прозвучивания всего требуемого объема, при этом для контроля стенок труб и цилиндрических резервуаров большого диаметра наиболее эффективным оказывается линейное сканирование вдоль образующей преобразователем, направленным вдоль окружности (рис. 6). При контроле труб малого диаметра (50–200 мм) применяется сканирование по окружности преобразователем, ориентированным вдоль

трубы по образующей, при этом контактная поверхность преобразователя адаптирована соответствующим образом. Максимальная дальность обнаружения дефектов в трубах малого диаметра достигает 8 м.

Как и при традиционном УЗК для технологии LRGWI следует различать предельную чувствительность, выражаемую минималь-

ным размером уверенно обнаруживаемого искусственного отражателя, и реальную чувствительность, характеризующую истинными размерами минимального реального дефекта, когда-либо обнаруженного при соответствующей предельной чувствительности. При этом установить корреляцию между предельной и реальной чувствительностью весьма сложно. На рис. 7 представлена фотография двух незначительных по глубине (1,4 мм) и размерам (менее 1 см в ширину и длину) коррозионных повреждений, раздельно обнаруженных в опорной плите толщиной 12,5 мм в резервуаре, заполненном продуктом, с расстояния приблизительно 900 мм при настройке прибора на предельную чувствительность, обеспечивающую обнаружение засверловки диаметром 12 мм со сферическим дном глубиной 6 мм на поверхности образца. По данным организации, выполнявшей контроль, амплитуды сигналов от реальных дефектов на 1–2 дБ превышали амплитуду эхо-сигнала от эталонного отражателя. Данное положение, с одной стороны, позволяет положительно оценить реальные возможности технологии LRGWI по обнаружению коррозионных повреждений, а с другой — четко иллюстрирует невозможность оценки абсолютного значения остаточной толщины объекта в месте коррозионного повреждения, базируясь на амплитуде эхо-сигнала. Поэтому оптимальной стратегией применения технологии LRGWI является мониторинг, при котором объект в процессе эксплуатации контролируется с определенной периодичностью, и результаты контроля, содержащие информацию о местоположении повреждений и площади, занимаемой ими (см. рис. 5) для одних и тех же участков, «накладываются» друг на друга, что позволяет с высокой степенью достоверности отследить динамику развития дефектов.

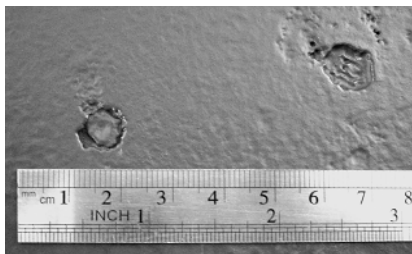


Рис. 7. Реальные дефекты, раздельно обнаруженные в опорной плите резервуара, заполненного продуктом, с расстояния приблизительно 900 мм

Для корректного применения любой технологии следует четко представлять ее недостатки. Технология LRGIWI не является исключением и характеризуется следующими ограничениями:

- невозможностью определения абсолютного значения остаточной толщины объекта в месте обнаруженного коррозионного повреждения без проведения дополнительных абсолютных измерений с использованием какой-либо другой технологии;
- невозможностью определить на какой из поверхностей объекта контроля находится обнаруженное коррозионное повреждение (на сегодняшний день фирма Sonotron NDT уже владеет принципиальным решением данной проблемы, но до внедрения в практику контроля еще требуется определенное время);
- значительные по площади и глубине коррозионные повреждения не могут быть обнаружены с использованием технологии LRGIWI, если в области повреждения отсутствуют перепады по толщине, способные сформировать эхо-сигнал. Данный недостаток является принципиальным, а потому для обнаружения плавной деградации толщины объекта дополнительно применяют технологию CHIME.

### Технология CHIME

Изначально технология CHIME (*Creeping/Head wave Inspection Method*) была создана для обнаружения коррозионных повреждений в стенке трубы, расположенной на опоре, в качестве альтернативы рискованному подъему трубы с помощью крана на несколько сантиметров над опорой с последующей эхо-импульсной толщинометрией вручную [6, 7].

В основе технологии CHIME лежит прозвучивание контролируемого объекта (стенки трубы или резервуара, листа и т. п.) в теновом варианте парой наклонных преобразователей, работающих на продольных волнах. Механизм формирования регистрируемого сигнала иллюстрируется рис. 8.

Продольная волна, генерируемая короткими импульсами под углом в объекте контроля, характеризуется широкой диаграммой направленности, а потому часть ее энергии распространяется от излучателя к приемнику непосредственно вдоль поверхности сканирования, испытывая значительное затухание (головная волна). Для угла призмы, необходимого для наклонного возбуждения продольной волны (менее первого критического), поперечная волна неизбежно возникает вместе с про-

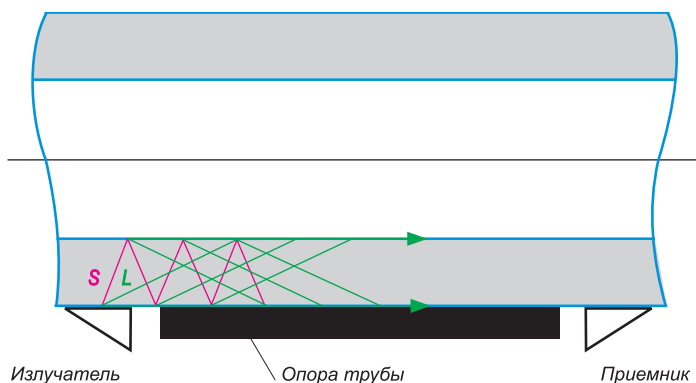


Рис. 8. Схематическое представление формирования сигнала, используемого для оценки коррозионного состояния объекта при реализации технологии CHIME: S и L — компоненты поперечной и продольной волн соответственно

дольной и распространяется под небольшим углом к внутренней стороне объекта контроля, испытывая значительно меньшее затухание. При этом, в соответствии с известными соотношениями для расчета прозрачности границы «преобразователь — объект контроля» [8, с. 20–22], энергия возбужденной таким образом поперечной волны превышает энергию продольной. Достигнув внутренней поверхности объекта контроля, поперечная волна частично возвращается к поверхности сканирования под тем же небольшим исходным углом. Помимо этого появляется продольная волна, пучок которой имеет широкое раскрытие, обуславливающее возникновение головной волны и на внутренней поверхности объекта. Распространяющаяся под углом компонента продольной волны при достижении противоположной поверхности объекта контроля вызывает аналогичные явления — частичную трансформацию в поперечную волну и «подпитку» энергией головной волны. Рассмотренный процесс циклически повторяется на обеих поверхностях объекта при достижении их компонентами поперечной и продольной волн, в результате чего сигнал на приемном преобразователе представляет собой пачку импульсов (рис. 9).



Рис. 9. Пачка импульсов на приемном преобразователе при реализации технологии CHIME (расстояние между преобразователями 32 см, толщина стенки 20 мм) продольной волн соответственно

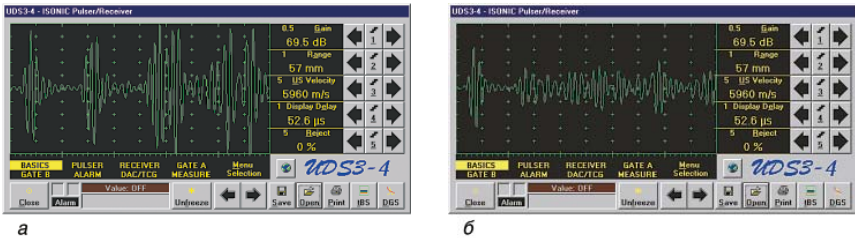


Рис. 10. Фрагмент сигнала при реализации технологии CHIME в отсутствие (а) и при наличии (б) коррозионного повреждения между преобразователями

При реализации технологии CHIME интерес представляет не вся пачка импульсов, а только ее часть, состоящая из нескольких четко разрешаемых периодически повторяющихся импульсов, которые удобно наблюдать, увеличив задержку начала развертки и уменьшив ее длительность. При прозвучивании некорродированного участка период повторения наблюдаемых импульсов пропорционален толщине объекта контроля (рис. 10а). В случае наличия коррозионного повреждения между преобразователями импульсы, следующие с периодом, соответствующим номинальной толщине объекта контроля, уменьшаются по амплитуде, а в дополнение к ним появляется ряд новых импульсов, следующих с меньшим периодом (рис. 10б).

Для реализации технологии CHIME осуществляется линейное сканирование парой преобразователей, расположенных с обеих сторон контролируемого участка, с регистрацией CHIME-изображения, внешне сходного с TOFD-изображением. На рис. 11 представлено типичное зарегистрированное CHIME-изображение на этапе анализа результатов контроля и восстановленные А-скан реализации для бездефектного и поврежденного участков.

Технология CHIME позволяет уверенно выявлять коррозионное повреждение площадью порядка  $10 \text{ см}^2$  и более как при плавном, так и при резком перепаде толщин в месте деградации. Минимальная глубина уверенно обнаруживаемых повреждений 1,5–2 мм. Расстояние между преобразователями может составлять до 1 м. Важно, что настройка чувствительности может производиться непосредственно на объекте контроля, поэтому нет необходимости в изготовлении тяжелых и громоздких стандартных образцов. К недостаткам технологии CHIME следует отнести:

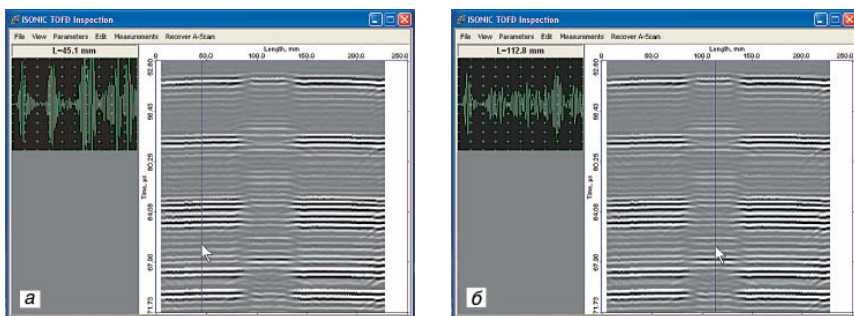


Рис. 11. Зарегистрированное CHIME изображение и восстановление А-скан реализаций на бездефектном (а) и дефектном (б) участках

- невозможность определения абсолютного значения остаточной толщины объекта в месте обнаруженного коррозионного повреждения без проведения дополнительных абсолютных измерений с использованием какой-либо другой технологии;
- невозможность определить, на какой из поверхностей объекта контроля находится обнаруженное коррозионное повреждение;
- невозможность определить, где именно между преобразователями находится коррозионное повреждение;
- нечувствительность к небольшим (площадью менее  $10 \text{ см}^2$ ) и к точечным коррозионным повреждениям.

### Аппаратура для реализации технологий CHIME и LRGWI

До недавнего времени контроль с использованием технологий CHIME и LRGWI осуществлялся весьма ограниченным числом крупных подрядчиков (например, RTD, Oceaneering, Physical Acoustics), использовавших преобразователи собственного производства и интегрировавших аппаратуру из доступных макрокомпонентов. Например, установка LORUS создана путем модернизации фирмой RTD известной установки P-Scan фирмы Force Institute. В результате для большинства подрядчиков и потребителей аппаратура и преобразователи, позволяющие осуществлять контроль с использованием технологий CHIME и LRGWI, были коммерчески недоступны. Такая ситуация позволяла названным фирмам контролировать 100% рынка предоставления услуг по контролю с использованием технологий CHIME и LRGWI, что особенно важно с учетом того, что данные услуги традиционно оплачиваются по весьма высоким расценкам.

Фирма Sonotron NDT является первым и пока единственным в мире производителем коммерчески доступного стандартного оборудования, позволяющего выполнять контроль с использованием технологий CHIME и LRGW. Начиная с 2000 г., пользователи приборов серии ISONIC 2001 могут оснащать их преобразователями, программным обеспечением и приспособлениями для реализации данных технологий. Технология LRGW поддерживается программными пакетами FLOORMAP (линейно-вращательное сканирование) и FLOORMAP\_L (линейное сканирование) и преобразователями серии S 544, адаптированными для сканирования по плоским и кривым поверхностям и для различных диапазонов толщин. Технология CHIME поддерживается программными пакетами FLOORMAP\_L, TOFD и EasyTOFD и преобразователями серии STPI 264 [6]. Помимо преобразователей в перечне стандартной продукции фирмы имеются разнообразные сканеры. Новый портативный дефектоскоп — рекордер ISONIC 2005, серийное производство которого начато в сентябре 2005 г., также оснащен соответствующим программным обеспечением и интерфейсом для подключения сканирующего устройства [9].

Важным моментом является возможность подключения дефектоскопов ISONIC 2001 и ISONIC 2005 к локальной компьютерной сети или непосредственно к офисному компьютеру посредством встроенных LAN или USB выходов для осуществления хранения и сопоставления файлов контроля одного и того же объекта, полученных в разное время, что позволяет осуществлять оффлайн мониторинг и анализ развития коррозии широкому кругу специалистов, воспроизводя при необходимости всю последовательность сигналов, зарегистрированных в процессе сканирования.

## Литература

1. Thompson N., Yunovich M., Dunmire D.J. Corrosion Costs and Maintenance Strategies — A Civil/Industrial and Government Partnership. — 2005, Aug 29 — [http://www.nace.org/Nace/images\\_ndx\\_story/08\\_29\\_05.asp](http://www.nace.org/Nace/images_ndx_story/08_29_05.asp)
2. Global Web Resource on Corrosion. — <http://www.corrosioncost.com>
3. Hoppenbrouwers M. B. et al. The LORUS technique for corrosion detection in hard-to-access locations. — Insight. 1997. V. 39. No. 12. P. 858–859.
4. Dijkstra F. H. NDT: Necessary Evil or Benefit. — The e-Journal of NDT. 1998. V. 3. No. 12 — <http://www.ndt.net/article/ecndt98/general/497/497.htm>
5. LORUS — Detection of corrosion in difficult to access areas. — <http://www.oceaneering.com/oilfield/InspectNDT/PDF/LORUS.pdf>
6. Passi G. ISONIC Operating Manual/Revision 8.00. — Rehovot: Sonotron NDT, 2004. — 529 p. (см. также <http://www.sonotronndt.com/pdf/opman80.pdf>).

7. Ravenscroft F., Hill R., Duffill C., Buttle D. CHIME — A New Ultrasonic Method for Rapid Screening of Pipe, Plate and Inaccess-ible Geometries. — The e-Journal of NDT. 1998. V. 3. No. 10 — <http://www.ndt.net/article/ecndt98/chemical/103/103.htm>

8. Гурвич А. К., Ермолов И. Н. Ультразвуковой контроль сварных швов. — Киев: Техника, 1972. — 460 с. 9. Sonotron NDT launches ISONIC 2005. — The e-Journal of NDT. 2005. V. 3. No. 8 — <http://www.ndt.net/news/2005/20050901sonotron.htm>