



УДК 621.19.16



## О КОЛЛЕКТИВНОМ ПРОЕКТЕ СТРАН ЕВРОПЫ ПО МОНИТОРИНГУ СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТОВ ПОСРЕДСТВОМ ДАЛЬНОДЕЙСТВУЮЩЕГО УЛЬТРАЗВУКА (LRUCM)

В. А. ТРОИЦКИЙ, А. И. БОНДАРЕНКО, Н. В. ТРОИЦКАЯ, А. Л. ШЕКЕРО

*Рассмотрены основные принципы метода дальнего ультразвука (LRUCM) для диагностики технического состояния протяженных инженерных конструкций и сооружений. Описаны цели и структура проекта LRUCM, который выполняется по плану 6-й Рамочной Программы Европейского Союза. Приведены результаты опроса потребностей стран Европы в технологии LRUCM, включая Украину.*

*The paper deals with the main principles of the long-range ultrasonic control method (LRUCM) for diagnostics of the technical condition of extended engineering structures and constructions. The goals and structure of LRUCM project fulfilled under the EU 6th Framework Program are described. Results of surveying the requirements of the European countries for LRUCM technology, including Ukraine are given.*

В странах Европы эксплуатируется множество протяженных инженерных конструкций и сооружений, основными из которых являются нефте- и газопроводы, железнодорожные рельсы, морские основания, вантовые мосты, плоские речные сваи и волнобойные стенки. Результатом длительной эксплуатации этих конструкций в естественных условиях является образование в них поврежденных различного происхождения и формы (трещины, коррозия и т. д.). Для решения задач диагностики технического состояния таких объектов странами Европы инициировано выполнение проекта «Мониторинг состояния объектов посредством дальнего ультразвука (LRUCM)» (в оригинале — Long Range Ultrasonic Condition Monitoring), который выполняется по плану 6-й Рамочной Программы Европейского Союза. Для выполнения проекта создан Консорциум, в состав которого входят следующие организации:

федерации, общества и ассоциации по неразрушающему контролю (Общества по НК): EFNDT (Бельгия), DGZfP (Германия), AEND (Испания), APMI (Португалия), AIPnD (Италия), BSpZ (Болгария), USNDT (Украина);

малые и средние предприятия по НК (МСП): CPS (Англия), I&T (Италия), Sonatest (Англия), Isotest (Италия), RARI (Португалия), ACIL (Португалия), Atlantis NDE (Испания), NDT Con (Англия), ATG (Чехия);

научно-исследовательские организации (НИИ): TWI (Англия), ISQ (Португалия), KCC (Англия), Zenon (Греция), KTU (Литва), Nexus (Болгария).

Организация, ответственная за выполнение работ по проекту — TWI Ltd (Англия). Целью проекта является развитие новых технологий диагнос-

тики и контроля протяженных инженерных сооружений и прежде всего разработка новых технологических инструментов — датчиков и систем дальнего ультразвукового контроля (УЗК), предназначенных для обнаружения дефектов и коррозионных поражений.

Используемые на протяжении последних пятидесяти лет методы контроля протяженных инженерных сооружений имеют основной недостаток: с определенного места может быть проконтролирована только небольшая по площади зона с максимальными размерами, измеряемыми десятками миллиметров. Это значит, что для контроля больших конструкций, таких как трубопроводы и трубные конструкции, мостовые канаты, рукавные части оснований морских платформ и др., необходимы большие временные и финансовые затраты. Кроме того, эти методы контроля требуют доступа непосредственно ко всем участкам конструкции в целом. Затраты на обеспечение доступа к поверхностям конструкции могут превышать затраты по диагностике конструкции в 5...10 раз, что приводит к значительным общим затратам.

**Основные принципы метода дальнего ультразвукового УЗК.** Метод дальнего ультразвукового УЗК (LRUT) основан на использовании направленных волн, способных распространяться на большие расстояния от места закрепления датчиков, что позволяет по эхо-сигналам обнаруживать, к примеру, коррозионные поражения. Термин «направленная волна» в неразрушающем контроле (НК) означает «волну с высокочастотной модой, распространяющуюся вдоль пластин и труб». Эти волны характеризуются небольшим затуханием, так



как энергия при распространении концентрируется между нижней и верхней поверхностями трубы. При НК трубопроводов направленными волнами используется именно их способность распространяться на большие расстояния, что позволяет контролировать участки трубопроводов от нескольких метров до нескольких десятков метров. Поэтому по сравнению с традиционными методами контроля производительность контроля направленными волнами намного выше, а стоимость ниже.

Принципы метода LRUT для контроля трубопроводов отличаются от принципов традиционных методов НК. На рис. 1, а приведена схема контроля трубопроводов традиционными методами (ультразвуковым, вихретоковым, цифровой радиографией и т. д.), которые позволяют контролировать только небольшие по площади участки (несколько квадратных сантиметров), находящиеся непосредственно под преобразователем. Предлагаемая схема контроля методом LRUT, принцип действия которого основан на использовании направленных волн, показана на рис. 1, б. Посредством этого метода можно контролировать десятки метров инженерных протяженных конструкций с одного подготовленного участка на их поверхности, даже если эти конструкции находятся под землей и имеют изоляционные покрытия. В LRUT направленная волна возбуждается пьезо- или электромагнитными преобразователями, расположенными в кольце, которое закрепляется на трубе по периметру.

Направленная волна по типу может быть продольной или крутильной. Пакетные сигналы имеют частоту от 20 до 100 кГц. Неспособности в трубе отражают ультразвук обратно на кольцо преобразователей. Время прохождения волны от кольца к дефекту и обратно к кольцу дает возможность определить местоположение дефекта в трубе с достаточной точностью (приблизительно  $\pm 100$  мм). Сварные соединения трубопроводов являются симметричными отражателями, поэтому

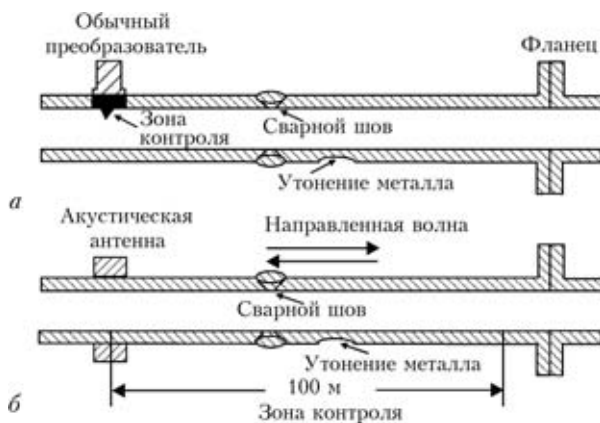


Рис. 1. Схема контроля трубопровода традиционными методами (а) и методом дальнего УЗК направленными волнами (б)

они симметрично отражают волны обратно к кольцу преобразователей. Такие отражатели, как коррозионные поражения, являются асимметричными отражателями и поэтому вызывают конвертацию волновой моды, что позволяет отличать их от сварных соединений. Достоверно определяются дефекты, площадь поперечного сечения которых составляет более 10 % толщины стенки трубы.

**Цели и структура проекта LRUCM.** В процессе выполнения работ по проекту будут

1) разработаны:

новые многоканальные дефектоскопы, в которых каждый канал будет иметь свой адрес, что позволит возбуждать преобразователи как фазированную решетку;

сенсорные решетки для возбуждения различных типов волновых мод, что позволит увеличить протяженность контроля до 200 м и более;

алгоритмы обработки сигналов и программное обеспечение для УЗК протяженных сооружений;

2) исследованы:

влияние на чувствительность и протяженность контроля различных факторов, таких как покрытия, виды почвы, типы и характеристики продукта, геометрия трубы, а также характер несплошности;

возможность уменьшения усилия прижима пьезопреобразователей к трубе, а также возможность использования электромагнитных сенсоров;

возможность дополнительного применения метода LRUT, например, для контроля плоских свай, которыми укреплены тысячи километров побережья Европы и берегов рек.

Проект LRUCM содержит 10 рабочих пакетов (WP). Структурная схема проекта приведена на рис. 2.

На схеме не показаны рабочие пакеты — WPA и WPJ. Задачей рабочего пакета WPA является изучение потребностей рынка в технологии LRUT в странах Европы. С этой целью было проведено изучение потребности промышленности Европы в методе LRUT в странах, участвующих в Консорциуме. В выполнении пакета WPA принимают участие все участники консорциума. Пакет WPJ обеспечивает управление проектом и выполняется лидером проекта — организацией TWI Ltd (Англия).

**Опрос потенциальных потребителей технологии LRUT.** Для изучения потребностей рынка в технологии LRUT были разработаны опросные формы по шести потенциальным областям применения данного метода:

технологические трубопроводы для углеводородов, химикатов, воды и других технологических продуктов;

магистральные трубопроводы для транспортировки газов, углеводородных жидкостей, воды и других продуктов;

рельсы для железных дорог;  
 трубы для всех типов теплообменников — из черных и цветных металлов;  
 кабели из многожильной проволоки для поддержки пролетов мостов и других применений;

гофрированные секции для укрепления берегов рек и морей, а также глубоких траншей.

Общества по НК направляли опросники на предприятия и в организации — потенциальным пользователям новой технологии. Всего было получено 49 ответов.

От Украины в опросе, проведенном Украинским обществом НКТД, приняли участие научно-исследовательские и учебные организации, предприятия различных форм собственности, работающие в области НК и ТД промышленных объектов (всего 19 организаций). Среди организаций, давших наиболее полные ответы на вопросы опросника, следует отметить следующие:

ЗАО «Морское бюро Регистра», Одесса;

ЗАО «Северодонецкое объединение «Азот», Луганская область;

МП «ДИСИТ» НАН Украины, Киев;

Энергоналадка Киевэнерго, Киев;

ООО «Энергосервис», Харьков;

АЦНК при Институте электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев;

ОКБ ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев;

ГП «Центр сертификации и контроля качества строительства объектов нефтегазового комплекса Украины», Днепропетровск.

Исходя из собранной информации, вытекает много новых вопросов, что свидетельствует о необходимости дальнейшего общения с потенциальными потребителями технологии LRUT. В частности, из опросников получено недостаточное количество информации по экономическим вопросам в связи с ограничением для многих компаний давать эту информацию. Сбор информации продолжается.

Далее в обзоре рассматриваются результаты опроса по различным направлениям.

**Активность компаний** (рис. 3). Респондентов просили отметить принадлежность к соответствующему типу организации.

Свыше 30 % предприятий, принявших участие в опросе, — поставщики услуг по НК. Кроме того, отмечено, что

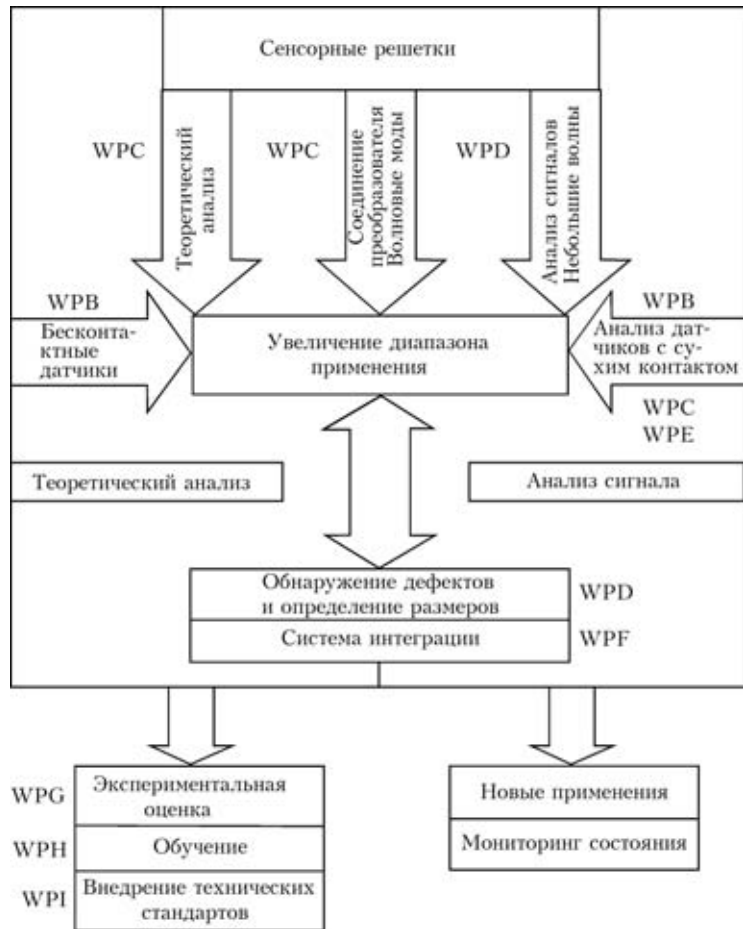


Рис. 2. Структурная схема проекта LRUCM

все поставщики услуг по НК, участвовавшие в опросе, — МСП. Они выполняют контроль для владельцев или поставщиков оборудования (или отдельных его частей). Также они выполняют работы по НК для подрядчиков по инженерным и строительным работам, обслуживают технологические заводы.

Производителями и поставщиками средств для НК также являются МСП. Их рынок распростра-

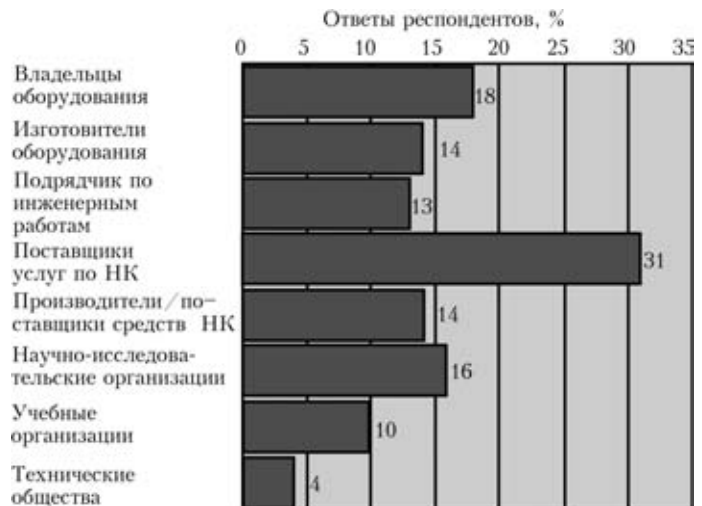


Рис. 3. Активность компаний

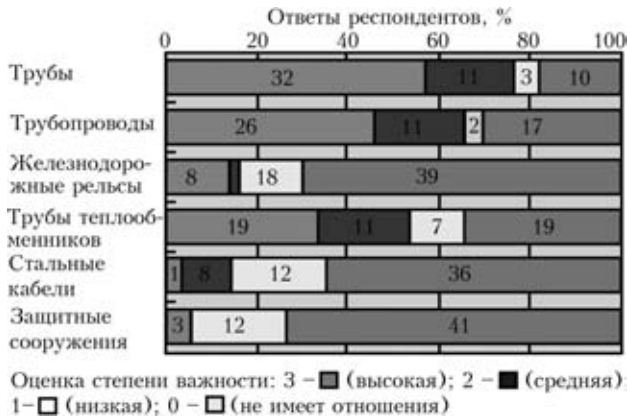


Рис. 4. Продукция, относящаяся к деятельности компаний  
 няется не только на организации, предоставляющие услуги по контролю, но и на некоторых владельцах заводов, эксплуатационщиков, которые имеют свои отделы контроля.

Многие производители и поставщики средств для контроля, кроме того, являются учебными организациями, в тех случаях, когда обучение обеспечивает цельность их услуг заказчику. Научно-исследовательская работа является основным видом деятельности для тех производителей средств НК, которые ищут новые виды применения для своих приборов и материалов.

**Продукция, относящаяся к деятельности компаний** (рис. 4). Опрашиваемых попросили оценить промышленную продукцию в зависимости от степени важности для их деятельности по шкале от 3 (высокой) до 1 (низкой) или как не относящуюся к их деятельности (0).

Деятельность опрошенных компаний в основном направлена на контроль труб при их изготовлении (32%), трубопроводов (26%) и заводского оборудования, такого, как теплообменники (19%). Интерес к контролю железнодорожных рельсов имеют специалисты, работающие в этой области, а также некоторые сервисные компании,

увидевшие потребность в их контроле, не удовлетворенную существующими технологиями. Один опрашиваемый интересуется контролем стальных кабелей (владелец вантового моста). Диагностика защитных сооружений — еще один пример в пользу применения метода LRUT в гражданском строительстве, где в настоящее время невелика потребность в услугах по контролю из-за отсутствия приемлемой технологии.

**Методы эксплуатационного контроля** (рис. 5). Опрашиваемых попросили отметить уровень текущего применения от 3 (высокий) до 1 (низкий). Результаты по различным типам продукции (трубам, трубопроводам, рельсам, трубам теплообменников, кабелям и защитным сооружениям) были объединены.

Основными методами НК, отмеченными в анкетах, являются магнитный, капиллярный, вихретоковый, ультразвуковой и радиографический. Эти пять методов охвачены национальными и международными схемами подготовки и сертификации специалистов по НК. Визуальный контроль является неотъемлемой частью всех остальных методов контроля, но часто используется самостоятельно в тех случаях, когда все дефекты выходят на поверхность и достаточно велики, что позволяет видеть их невооруженным глазом. Выходящие на поверхность несплошности — это обычно намного более серьезные дефекты, чем подповерхностные, хотя и подповерхностные дефекты могут дорасти до поверхности и вызвать затем быстрое разрушение. Магнитный и капиллярный методы контроля используются для обнаружения выходящих на поверхность дефектов с малым раскрытием, и, следовательно, являются достаточно распространенными методами контроля. Вихретоковый метод контроля имеет большую чувствительность к дефектам, выходящим на поверхность, а вихретоковые датчики открывают доступ к таким скрытым поверхностям, как внутренняя поверхность труб. Ультразвуковой и радиографический контроль используются для выявления внутренних дефектов. С недавнего времени они автоматизированы. При автоматизированном УЗК используются механические сканеры и компьютерные программы для сбора и анализа данных. При автоматизированном радиографическом контроле для сбора данных о дефектах вместо рентгеновской пленки используются детекторные решетки и цифровые методы для улучшения изображений.

Из результатов опроса видно, что автоматизированные методы распространяются пока медленно. Только 19% ответивших проявляют большой интерес к автоматизированному УЗК, несмотря

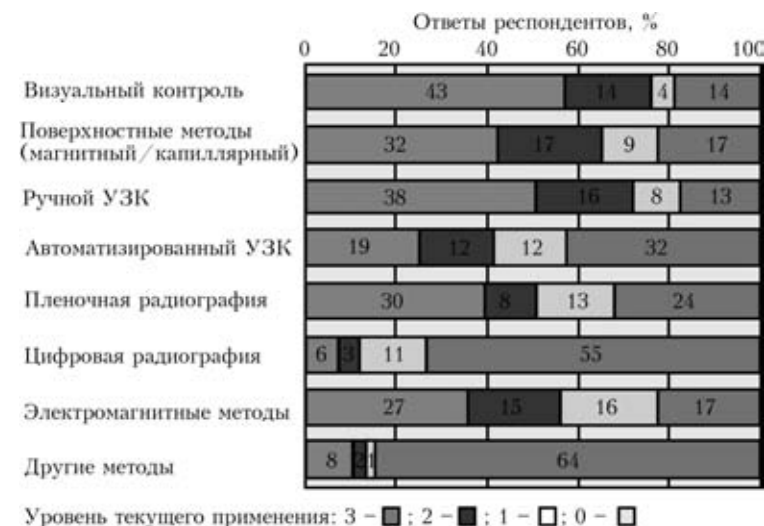


Рис. 5. Методы эксплуатационного контроля

на недавно введенные национальные стандарты и нормы для автоматизированного УЗК трубопроводов и сосудов давления. Цифровая радиография — новая технология и прежде чем метод может быть реализован необходимо аттестовать нормы и методики проведения такого контроля.

При эксплуатационном контроле качества труб используется широкий диапазон методов, причем чаще всего применяется ручной УЗК, за которым следуют методы поверхностного контроля и радиография. Реже остальных используются вихретоковые методы. Ультразвуковые методы применяются в основном для измерения толщины конкретных участков трубопроводов, таких как гибы и отводы. При этом применяются простые в использовании цифровые толщиномеры, не требующие специальной подготовки поверхности.

Ручной УЗК также является широко используемым методом контроля трубопроводов. Важную роль для контроля трубопроводов играют электромагнитные методы. Они используются во внутритрубных снарядах, которые пропускаются через трубу вместе с потоком продукта, переносимым датчики, и выявляют коррозию, трещины, вмятины и другие повреждения. В тех местах, где обнаружены следы дефектов, для определения их размеров применяется ручной УЗК и радиография.

Для выявления трещин в рельсах используется в основном автоматизированный УЗК, дающий возможность контролировать путь со скоростью до 35 км/ч. По-прежнему есть необходимость в проведении ручного УЗК дефектных участков для подтверждения показаний автоматизированного контроля. Один из респондентов заинтересован в контроле железнодорожного пути для выявления радиальных трещин, образовавшихся вокруг отверстий под болты для крепления накладок.

Трубки теплообменников контролируются в основном вихретоковым методом. Это достаточно быстрый контроль, хотя его скорость снижается в связи с необходимостью очистки труб. Несмотря на высокую надежность, существуют проблемы с контролем в местах отверстий и бандажей.

Один респондент — владелец моста — использует только визуальный метод, хотя он и знает о существовании электромагнитного метода для контроля кабелей. Некоторые компании по НК проявили интерес к раз-

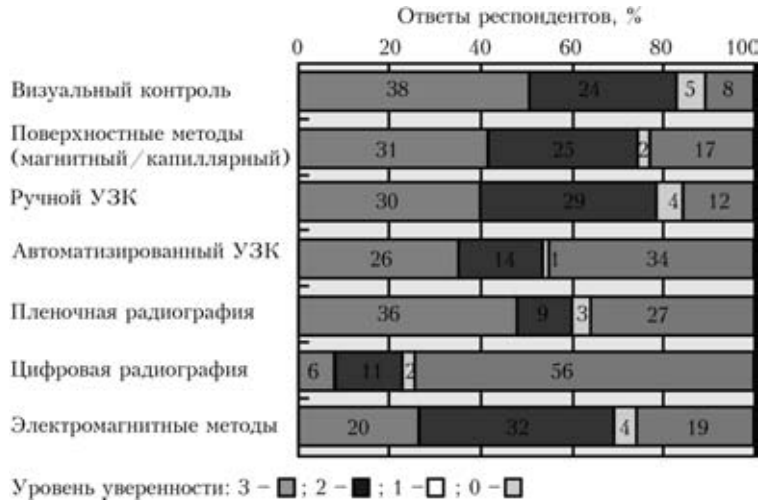


Рис. 6. Степень уверенности в результатах методов контроля

витию новой технологии для контроля кабелей канатных подъемников.

Отбойные стенки для защиты причалов в гаванях должны контролироваться под водой. Поэтому контроль таких объектов ограничивается применением визуального метода и измерением толщины с помощью УЗК.

**Уверенность в методах контроля** (рис. 6). Ответивших попросили оценить используемые ими в настоящее время перечисленные выше методы по уровню уверенности в результатах от 3 (высокий) до 1 (низкий).

Высокую степень уверенности в применяемых методах контроля имеют около 1/3 опрошенных, что больше имеющих только среднюю степень уверенности. Количество респондентов с низкой степенью уверенности незначительное. Относительно метода цифровой радиографии и вихретокового метода контроля большее количество

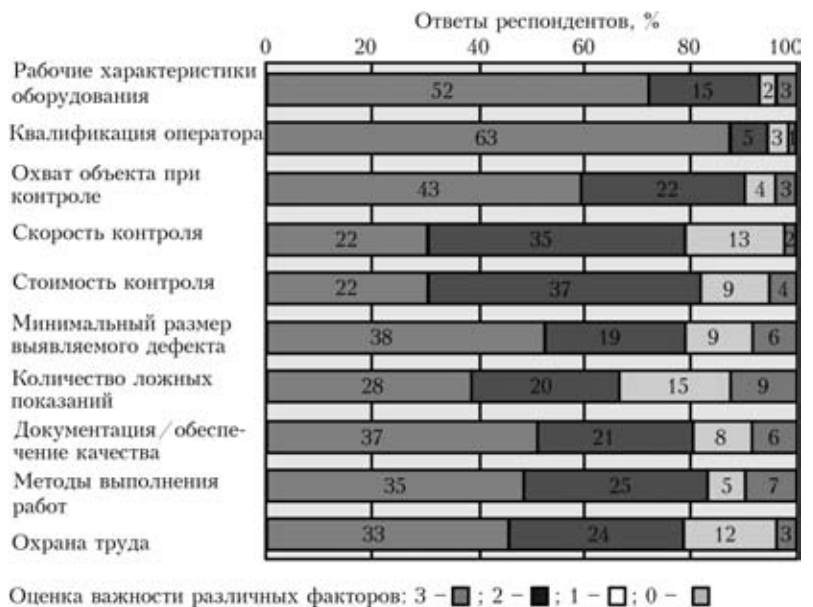


Рис. 7. Вопросы контроля



тво респондентов имеют среднюю степень уверенности.

**Вопросы контроля** (рис. 7). Опрашиваемых попросили оценить важность различных факторов для контроля той продукции, которую они диагностируют.

Результаты показали, что 65 % респондентов ответили, что при выполнении контроля такой фактор как «квалификация оператора» является очень важным и только 3 % посчитали его наименее важным. Представляется, что обучение и квалификация операторов по НК является ограничивающим фактором для быстрого внедрения метода LRUT.

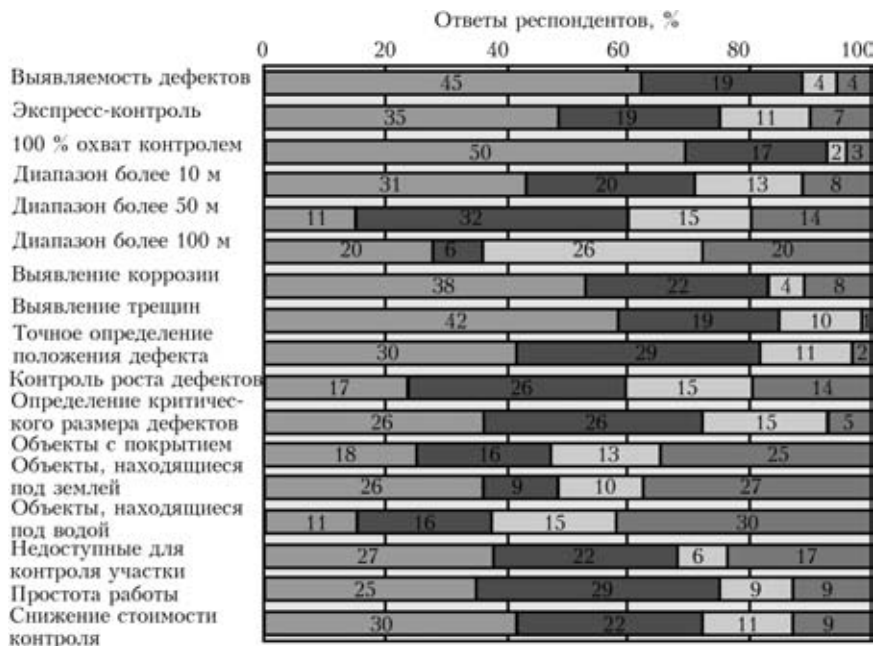
Как важный оценили фактор «характеристики оборудования» 52 % участвующих в опросе организаций. Однако 43 % опрашиваемых считают особенно важным «охват объекта при контроле», несмотря на внедрение методологии, основанной на выявлении областей с высокой вероятностью наличия в них несплошностей и их последующим детальным контролем. Неожиданно большой процент опрошенных считают, что «стоимость контроля» имеет среднюю важность (37 %). Очевидна сильная зависимость между «стоимостью контроля» и «скоростью контроля». Высокая важность фактора «минимальный размер выявляемого дефекта» подчеркнута 38 % ответивших, хотя этот умеренный процент объясняется пониманием специалистами того, что по мере повышения чувствительности контроля увеличивается и количество ложных показаний. Для 28 % предприятий, участвовавших в опросе, «количество ложных показаний» очень важно. Вопросы обеспечения качества и создания надежной системы документирования, оптимальных методов работы, охраны здоровья и труда операторов-дефектоскопистов признаются приблизительно одной третью компаний, принявших участие в опросе.

**Предполагаемые преимущества метода LRUT** (рис. 8). Опрашиваемых попросили отметить предполагаемые преимущества технологии LRUT. Наиболее важным предполагаемым преимуществом LRUT 50 % респондентов считают такой фактор контроля, как «100%-й охват объекта при контроле» (рис. 8), в то время, как для 26 % опрашиваемых наименее важным преимуществом LRUT является «диапазон контроля свыше 100 м». Кроме того, важным преимуществом

LRUT 45 % опрашиваемых отмечен фактор «выявляемость дефектов» при контроле. Фактор «выявление трещин» считают важным большее количество опрашиваемых (42 %), чем тех, которые отметили фактор «выявление коррозии» (38 %), хотя последний фактор в действительности является самым важным преимуществом LRUT труб. Факторы «точное определение местоположения дефектов» и «определение критических размеров дефектов» находятся приблизительно на одном уровне по количеству ответов: 30 % респондентов отметили высокую важность «точного определения положения дефектов» и лишь немного меньшее количество 26 % — «определение критического размера дефектов». Фактор «контроль роста дефектов» большинство ответивших (26 %) посчитали преимуществом средней важности.

Одной из исходных целей новой технологии — технологии LRUT — является выявление дефектов на недоступных контролю участках труб (в изоляции, в воздушных, подземных и подводных переходах). Поэтому для многих респондентов (26 %) очень важен контроль объектов, находящихся под землей, так же как он важен и тем (27 %), кому требуется диагностировать недоступные для контроля участки объектов, которые могут находиться над землей.

В противоположность высокому уровню важности, присвоенному фактору «квалификация оператора» в разделе «Вопросы контроля», фактор «простота работы» оборудования для LRUT, который играет важную роль в работе оператора, считают очень важным только 25 % ответивших. Некоторые респонденты устно прокомментировали



Оценка предполагаемых преимуществ технологии LRUT: 3 - ■; 2 - ■; 1 - □; 0 - □

Рис. 8. Предполагаемые преимущества LRUT



ли, что «простота работы» является важным фактором для уменьшения ошибок оператора.

«Снижение стоимости контроля» как важное преимущество метода LRUT рассматривают только 30 % ответивших.

У некоторых компаний, занимающихся НК, уже есть опыт использования LRUT для испытания труб на наличие коррозии. Среди недостатков подчеркнуты следующие:

сложность убеждения заказчиков в преимуществах такой технологии контроля труб. Они считают, что единственная ценность контроля заключается в возможности определения размеров дефектов. Одно лишь выявление дефектов является недостаточным;

сложность контроля закопанной в землю трубы из-за высокого затухания ультразвука;

отсутствие нормативной документации на использование этого метода.

**Экономические аспекты.** Респондентов попросили ответить на вопрос об обычной частоте контроля и вероятной стоимости его выполнения с точки зрения предоставляющих услуги по контролю компаний и экономическом аспекте с точки зрения владельцев/эксплуатационщиков.

Очень мало ответивших заполнили эту часть вопросника. Те, кто это сделал, высказали следующие замечания:

частота контроля сильно различается: от нескольких дней (при контроле для мониторинга конкретных трещин) до периодов, равных 12 годам (между капитальными ремонтами или остановками);

стоимость LRUT должна быть на уровне стоимости автоматизированного УЗК, чтобы покрыть высокие капитальные вложения и стоимость подготовки операторов. Типичные цифры — 1500...2000 евро в день;

экономический эффект зависит от объема применения.

## Выводы и рекомендации

На заседании, посвященном итогам первого года выполнения работ по проекту, состоявшемуся 1–2 октября 2006 г. в Берлине, были сделаны следующие выводы и рекомендации.

Продолжается сбор информации о потребностях в новой технологии дальнего действия низкочастотного УЗК (LRUT).

Для продолжения сбора информации о потребностях в новой технологии, ее ограничениях, для

определения рынка для данной технологии организациям Украины и России, которые занимаются диагностикой промышленных объектов и конструкций, предложено выходить на созданный веб-сайт проекта: [www.lrucm.eu.com](http://www.lrucm.eu.com). Там размещена информация о проекте LRUCM, а в разделе «Questionnaire» помещен опросник по маркетингу технологии LRUT.

В рамках проекта LRUCM основное внимание уделено контролю трубопроводов. Именно для контроля трубопроводов и была применена в начале 1990-х годов идея метода LRUT. Планируется расширить эту технологию на трубы с гребнями, увеличить дальность обнаружения дефектов при испытаниях подземных трубопроводов, направить усилия на выявление трещин и коррозии.

В Европе насчитывается более 300 вантовых мостов, многие из них разрушаются вследствие старения. Поэтому необходимо обследовать сложные крепления канатов и кронштейны для определения остаточного ресурса. Проектом LRUCM предусмотрена разработка средств для сбора основных данных о состоянии канатов мостов с тем, чтобы дать заключение о возможности их дальнейшей безопасной эксплуатации.

В Европе эксплуатируются тысячи километров речных и морских свайных укреплений, служащих для защиты береговой линии. Основную опасность представляет коррозия, поэтому необходим экономичный метод для определения степени коррозионного ослабления. Проект LRUCM нацелен на создание средств быстрого контроля состояния свай и морских платформ для определения тех, которые нуждаются в замене.

Хотя с помощью вихретокового метода хорошо контролируются неферромагнитные трубы, достаточно сложно применить этот метод для контроля ферромагнитных стальных труб, используемых в большинстве теплообменников. Дальнедействующий низкочастотный ультразвук может стать альтернативным методом для контроля таких труб. В ходе выполнения проекта LRUCM будет разработано оборудование, позволяющее выполнять этот контроль более эффективно, без предварительной очистки внутренних каналов труб.

Проектом предусмотрена разработка программы для обучения персонала данному методу контроля, а также необходимых экзаменационных материалов и образцов, отвечающих требованиям EN 473. Эта программа будет внедрена через существующие схемы национальных обществ по НК.