

# Диагностика технического состояния теплообменных аппаратов методом акустической импульсной рефлектометрии на опасных производственных объектах



**Д.В. Иншаков,**  
канд. физ.-мат. наук,  
вед. инженер – конструктор,  
d.inshakov@hm.irk.ru



**К.А. Кузнецов,**  
канд. техн. наук, первый  
зам. ген. директора

АО «ИркутскНИИхиммаш», Иркутск, Россия

## Введение

Контроль технического состояния труб и трубопроводных систем, в частности трубных пучков теплообменников, в рамках обеспечения требований промышленной безопасности при эксплуатации опасных производственных объектов в различных отраслях включает оценку состояния внутренней поверхности стенки труб: ее целостности, степени эрозионного износа, наличия отложений, качества очистки. Из-за малого внутреннего диаметра трубок теплообменников и их протяженности сужаются технические возможности контроля и получения достоверных результатов, а применение трубопроводного устройства для выявления дефектов достаточно затруднительно.

Реализация традиционного эндоскопического метода имеет принципиальные ограничения, связанные с длительностью процедуры. Теплообменник может содержать 2 тыс. и более трубок небольшого диаметра. При длине каждой трубки 5 м общая длина трубок, которую должен пройти эндоскоп, составит 10 км в каждую сторону. Существенные трудозатраты, длительное время простоя аппарата и отсутствие количественных показателей результата обследования делают эндоскопический метод в существующем варианте малоприменимым для сплошного контроля состояния труб теплообменников.

Сравнительно недавно для обследования внутреннего просвета труб малого диаметра стал применяться метод акустической рефлектометрии [1, 2]. Метод довольно широко известен. В технике его применяют

Рассмотрена диагностика технического состояния трубных пучков теплообменных аппаратов на опасных производственных объектах в период остановочного ремонта. Проанализированы возможные подходы к решению проблемы, связанной с ограниченным временем на обследование, большой суммарной протяженностью трубок в пучках и нечеткостью диагностических признаков дефектности трубок. Предлагается использование метода акустической импульсной рефлектометрии с анализом распределения трубок по степени дефектности.

**Ключевые слова:** техническая диагностика, акустическая импульсная рефлектометрия, трубопроводные системы, теплообменные аппараты.

DOI: 10.24000/0409-2961-2019-12-24-29

для измерения длины труб и уровня жидкости [3]. В музыкальной акустике он расширяет возможности теории духовых инструментов [4]. В биологии метод помогает в изучении и моделировании акустического голосового тракта [5], а в медицине нашел применение для обследования полостей человека или животных, например, дыхательных путей, пищеварительного тракта [6], при интубационных манипуляциях [7, 8], диагностике органов слуха [9, 10].

Для обследования трубных конструкций применяют импульсный сигнал, поэтому метод получил название акустической импульсной рефлектометрии (АИР).

Метод АИР позволяет за сравнительно короткое время обследовать большое число трубок теплообменного аппарата, что является важным преимуществом при сжатых сроках выполнения диагностических работ во время остановов технологических установок опасных производственных объектов на капитальный ремонт. В результате для каждой трубки записывается рефлектограмма, на которой отражены все неоднородности акустического тракта. Однако однозначной интерпретации поддаются только сигналы, имеющие хорошо выраженные признаки того или иного типа дефекта внутреннего объема трубы.

## Метод АИР и его применение

Сущность метода АИР, лежащего в основе работы приборов его реализующих, заключается в следующем. Акустический импульс возбуждается излучателем и со скоростью звука распространяется внутри вдоль трубы. Каждый дефект поверхности

стенки изменяет сечение просвета, а значит, изменяет акустический импеданс волнового тракта на пути звукового луча. В соответствии с теоретическими принципами акустики изменение акустического импеданса приводит к появлению отраженного луча, характеристики которого определяются особенностями профиля дефекта. В результате внутри трубы распространяются две волны в прямом и обратном направлениях. По отраженному сигналу оценивают характер неоднородности, ее местоположение в трубе и затухание сигнала в акустическом тракте. Например, отражение от сужения просвета имеет ту же фазу, что и зондирующий сигнал, а отражение от расширений сечения, отверстий в стенке или открытого конца трубы — противоположную фазу. Амплитуда отраженного сигнала зависит в первую очередь от степени изменения сечения. Сигнал воспринимается микрофоном, оцифровывается и анализируется с помощью различных алгоритмов.

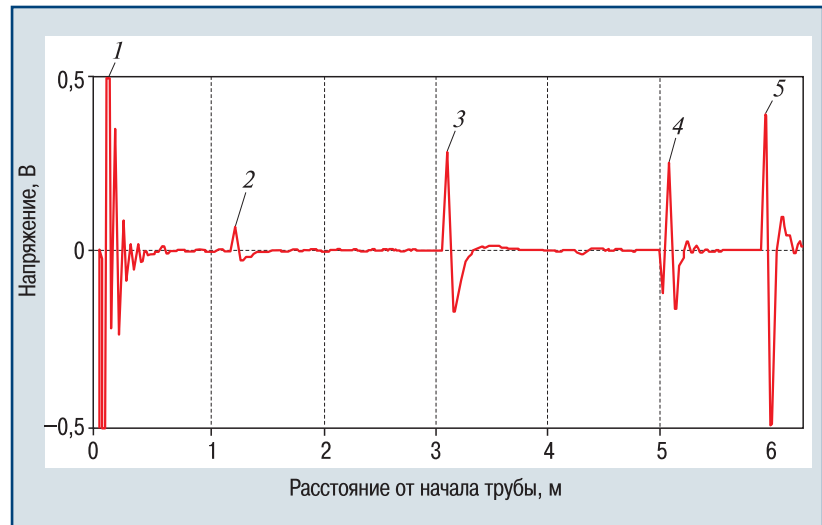
Для обследования технического состояния труб малого диаметра и трубных пучков теплообменных аппаратов разработан программно-аппаратный комплекс ПАКТ-04, работающий на основе принципа АИР [2]. Прибор предназначен для выявления дефектов и повреждений (коррозия, сквозные отверстия, свищи), отложений и окалины на внутренней поверхности труб.

Прибор адаптирован для быстрого контроля большого числа одинаковых труб с запоминанием информации. Реализована автоматическая запись эхограмм в файлы с уникальными номерами, привязанными к положению трубы в трубной доске. Имеются автоматический сигнализатор дефектов и система определения эквивалентного сечения дефектов. Время контроля каждой трубы, включая запись в память, составляет 1–2 с. Результат контроля представляется графически в виде структуры трубной доски с цветными ячейками. Каждая ячейка соответствует трубе, автоматически пронумерована и, если уже проконтролирована, помечена цветом, сигнализирующим о наличии дефектов. Прибор включен в реестр средств измерений Российской Федерации [11].

Практика работы с прибором и опыт обследования трубных пучков позволили разработать новый подход к методике диагностирования труб и трубных пучков теплообменных аппаратов.

Первичная информация, получаемая прибором АИР, выводится на экран монитора в виде рефлектограммы. На рис. 1 представлена рефлектограмма, измеренная с помощью прибора ПАКТ-04 на трубе, имеющей внутренний диаметр 20 мм и длину 6 м (здесь 1 — зондирующий импульс; 2 — отверстие;

3 — пропил; 4 — сужение; 5 — конец трубы). Труба содержит искусственные дефекты, дающие отраженный сигнал: отверстие диаметром 1,5 мм; продольный пропил 20×1 мм, имитирующий раскрытую трещину; сужение просвета до диаметра 15 мм длиной 65 мм.



▲ Рис. 1. Вид сигналов отражения от искусственных дефектов на экране прибора

▲ Fig. 1. The type of signals of reflection from the artificial defects on the device screen

Данная рефлектограмма получена в лабораторных условиях на металлопластиковой трубе с гладкой стенкой. Все дефекты дают четкий сигнал предсказуемых формы и размера без существенных шумовых составляющих. Реальный сигнал, полученный на промплощадке при обследовании бывшего в эксплуатации теплообменного аппарата, может существенно отличаться даже для трубы с похожими дефектами. Задача дефектоскописта заключается в том, чтобы по записанным сигналам определить техническое состояние аппарата.

Для того чтобы снизить вероятность ошибки, необходимо представлять поведение звуковой волны в нормальной гладкой трубе и при встрече ее с препятствиями.

Распространение звуковой волны внутри трубы отличается от распространения волны в свободном пространстве. Прежде всего это отсутствие расходимости волны, ограниченной стенками трубы. Во-вторых, на всем пути распространения волны в трубе она контактирует со стенкой.

Первое обстоятельство, казалось бы, должно резко сократить затухание с расстоянием. Ведь, согласно расчетам, если бы не было сферической расходимости волны, звук в воздухе затухал бы по амплитуде всего примерно в 3 раза на расстоянии 1 км на частоте 2 кГц. На низких частотах затухание еще меньше. Однако при продвижении вдоль трубы волна быстро теряет амплитуду из-за контакта со стенкой. Такое же трехкратное затухание звука в трубе, имеющей внутренний диаметр 20 мм, на-

блюдается уже на длине менее 10 м. Коэффициент затухания акустического сигнала в трубе изменяется не только количественно, изменяется степень частотной зависимости. Кроме того, наличие поглощения звуковой энергии должно приводить к дисперсии скорости звука в трубе. Особенности распространения монохроматических звуковых волн в трубах и формулы для расчета затухания приведены, например, в [12].

Распространение звукового импульса в трубе имеет свои свойства, связанные с широким спектром сигнала. Наличие спектральной зависимости поглощения и дисперсия волн приводят к искажениям формы импульса [13].

Еще большие искажения временная форма импульса претерпевает из-за наложения множественных отраженных и рассеянных на неоднородностях стенки волн.

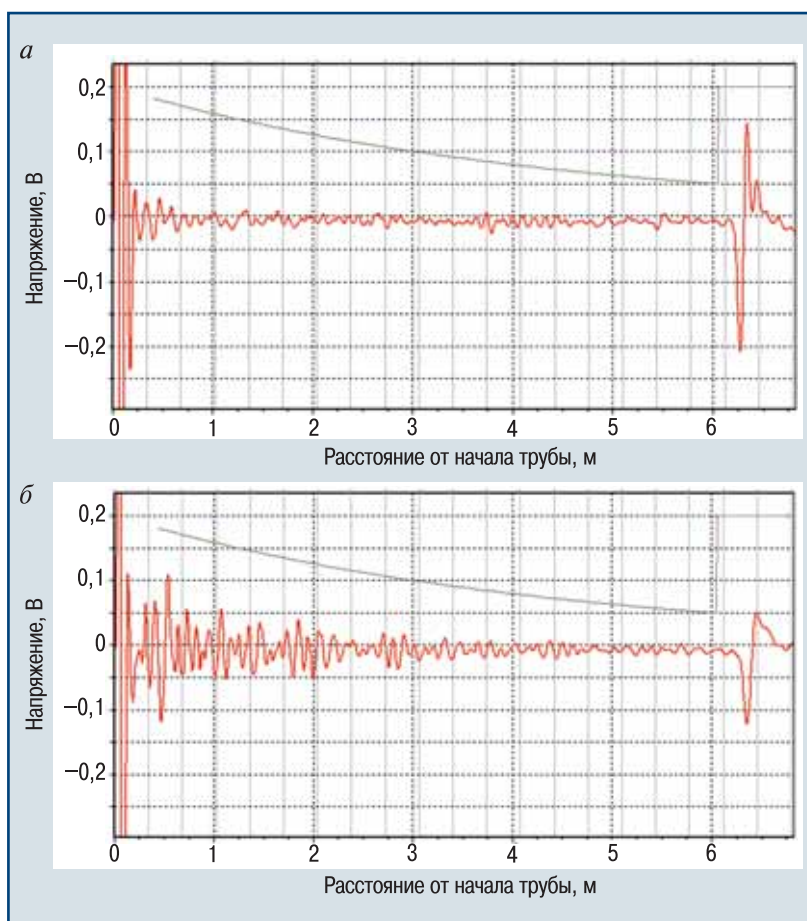
#### Определение степени дефектности труб

В отличие от традиционной ультразвуковой дефектоскопии локализованные дефекты дают сигналы отражения, принадлежность которых можно идентифицировать только в модельных случаях.

В реальной ситуации приходится сталкиваться с трубными пучками, поверхность труб которых несет следы коррозии и различного рода отложений. На эхограмме появляется структурный шум, на фоне которого и выявляются признаки локальных дефектов. При этом можно забраковать трубу из-за нескольких кусочков окалины, удачно имитирующих отражение от небольшого свища, и пропустить раскрытую трещину.

На рис. 2 показаны реальные рефлектограммы теплообменного аппарата после промывки струей воды под давлением: лучшая по качеству поверхности труба (рис. 2, а) и типичная эхограмма для большинства труб данного аппарата (рис. 2, б). Найти трещину, тем более нераскрытую, по такой эхограмме среди тысячи труб вряд ли удастся. Однако эти рефлектограммы несут информацию о техническом состоянии трубного пучка. И решать обратную задачу рассеяния акустического сигнала по теоретическим моделям, для того чтобы узнать, как может выглядеть «вероятный виновник», не всегда лучший путь.

Предлагается иной подход к диагностике технического состояния трубных пучков теплообменных аппаратов. Обследование методом АИР преследует три цели: во-первых, традиционно, это поиск локальных дефектов по характерным эхо-сигналам; во-вторых,



▲ Рис. 2. Примеры рефлектограмм рабочего теплообменного аппарата  
▲ Fig. 2. Examples of reflectograms of the working heat exchanger

анализ состояния труб по результатам статистической обработки эхограмм и расчета распределения трубок по степени дефектности; в-третьих, отбраковка труб, параметры дефектности которых находятся на «хвосте» распределения.

В основе концепции лежит принцип коллективного старения (износа), приводящего к появлению опасных и неустраняемых дефектов. Возникновение дефектов такого рода хорошо известно эксплуатационникам. С течением времени эксплуатации теплообменного аппарата на его трубной доске на концах разгерметизированных трубок устанавливаются заглушки. Число их растет, и наступает момент, когда каждые повторные гидроиспытания после обнаружения и изоляции труб с протечкой вызывают разрыв чуть менее изношенных труб.

Речь идет не о заводских дефектах металла трубы, которые проявляются единичными инцидентами в теплообменнике на стадии его эксплуатационной «молодости». Предлагается определять признаки износа аппарата, его количественную характеристику, делать прогноз о возможности и сроках продолжения эксплуатации, устранять потенциальную проблему в виде дефектных трубок. Если обследование теплообменников методом АИР будет носить систематический характер, проявится динамика износа



аппарата, замена изношенных трубок станет носить профилактический, а не аварийный характер, то снизится вероятность незапланированных остановов оборудования.

Степень дефектности трубки — обобщенный количественный параметр, учитывающий степень эрозии стенки, наличие отложений, блокировок, свищей, т.е. дефектов и повреждений, обуславливающих потери трубкой эксплуатационных качеств, снижение ее функциональной способности в теплообменном аппарате. Определяется по изменению сигнала, распространяющегося в трубе. На рис. 3 представлены трубки с разной степенью дефектности. Нулевую степень дефектности имеет работоспособная, пригодная для эксплуатации труба с чистой внутренней поверхностью. Данный показатель около 0,5 показывает удовлетворительное состояние трубы. Степень дефектности в пределах 1–2 — требуется принятие мер с предварительным уточнением характера дефектности. Данный показатель, равный 3 и более — трубки не пригодны для эксплуатации (см. рис. 3).

При обследовании теплообменного аппарата значение степени дефектности вычисляется для каждой трубки по результатам измерений. Результаты содержатся в таблице с указанием координат трубки.

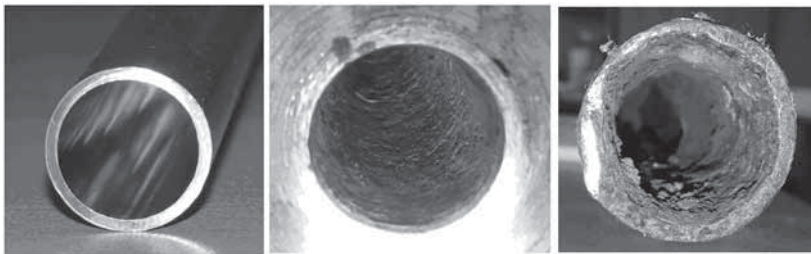
Трубки в пучке распределяются по степени дефектности в виде гистограммы или непрерывной

зависимости для большого числа труб. Для корректного сравнения состояния разных аппаратов графики нормируются, например по площади. Такой график представляет собой зависимость относительного числа трубок в интервалах группировки (относительной частоты) от значения степени дефектности.

На рис. 4 показаны трубная доска теплообменного аппарата и результаты обследования этого аппарата с помощью прибора ПАКТ-04 во время остановочного ремонта.

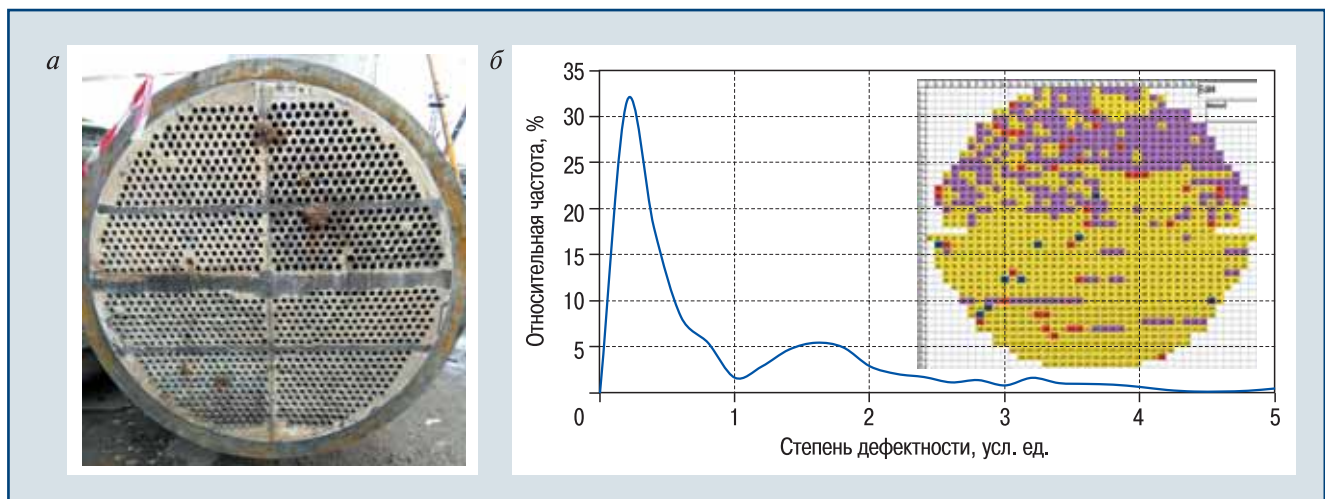
Результаты обследования и визуальный осмотр предполагают следующую тактику работы с аппаратом. Площади цветных областей под линией графика распределения на рис. 5 показывают число трубок. Зеленым цветом обозначены исправные трубки. Условно выделенная желтым цветом примерно пятая часть трубок должна быть очищена от налета, который не препятствует работе аппарата, но нарушает технологический режим [14]. Часть трубок (72) помечена красным цветом. Их степень дефектности больше 3, и от них нужно избавляться, поскольку они, во-первых, не могут участвовать в теплообмене, во-вторых, часть из них находится в потенциально аварийном состоянии. Оставшиеся 87 трубок из разных соображений экономической целесообразности могут быть отнесены к «красным» или «желтым». В первом случае выигрывается время, но есть возможность, что часть еще годных трубок будет забракована. Во втором — придется затратить время, чтобы их отчистить, более тщательно обследовать, чтобы выбрать годные и заглушить негодные трубки.

На рис. 6 показаны диаграммы распределения трубок по степени дефектности для четырех теплообменников разной степени износа (здесь 1 — ТО-001; 2 — ТО-003; 3 — ТО-вк; 4 — ТО-22). Первые два аппарата находятся в отличном состоянии. Остальные два



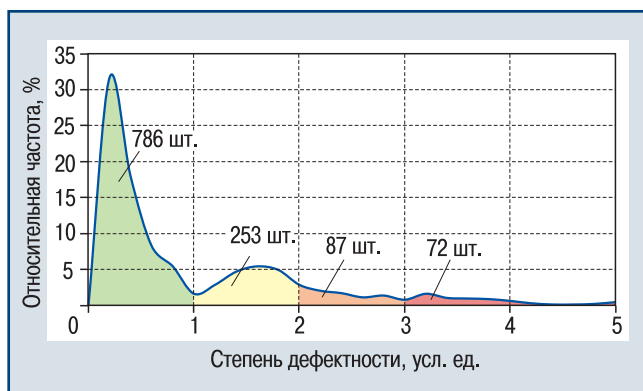
▲ Рис. 3. Трубы с разными измеренными значениями степени дефектности

▲ Fig. 3. Pipes with different measured values of defectiveness degree



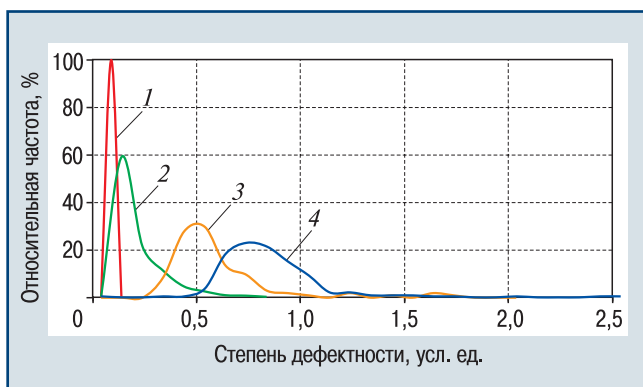
▲ Рис. 4. Трубная доска теплообменного аппарата (а) и результаты обследования в графическом виде (б)

▲ Fig. 4. Tube plate of the heat exchanger (a) and the survey results in the graphical form (b)



▲ Рис. 5. Распределение трубок по степени дефектности

▲ Fig. 5. Distribution of tubes according to the defectiveness degree



▲ Рис. 6. Результаты обследования теплообменных аппаратов с разной степенью износа

▲ Fig. 6. Results of inspection of heat exchangers with varying degrees of wear

теплообменника имеют максимумы распределения, заметно сдвинутые в сторону повышенной дефектности. Эти аппараты относятся к «проблемным». После гидроиспытаний часть трубок заглушена пробками, однако это не решило проблемы. Повторные испытания под давлением привели к дополнительным разрывам трубок.

Методом АИР аппараты обследованы уже после неоднократных гидроиспытаний. Оба аппарата имеют значительную часть заглушенных трубок. Теплообменный аппарат ТО-22 потерял более половины трубок, не прошедших гидроиспытания. Естественно, эти трубки не проходили обследования методом АИР. В результате диаграммы распределения сильно искажены по положению максимума, ширине. Общими признаками «проблемности» у них являются сдвиг начала распределения и его максимума вправо, а также длинные «хвосты», достигающие предельных значений степени дефектности. После отсева это единичные трубки, не заметные на нормированных кривых, но зафиксированные в таблицах.

#### Заключение

В диагностике технического состояния трубных пучков метод акустической импульсной рефлектометрии может быть отнесен к экспресс-методам,

применяемым дополнительно к существующим традиционным методам неразрушающего контроля. Посредством использования данного метода можно получить информацию об общем состоянии труб и трубных систем на этапе подготовки программы технического диагностирования.

#### Список литературы

1. *Condenser tube examination using acoustic pulse Reflectometry/ N. Amir, O. Barzelay, A. Yefet, T. Pechter// Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. — 2010. — Vol. 132. — P. 014501:1–014501:5.*
2. *Inshakov D.V., Bykov S.P., Kuznetsov K.A. ПАКТ-04: Device and Non-Destructive Testing of Heat-Exchange Equipment// Scientific Israel — Technological Advantages. — 2016. — Vol. 18 (1). — P. 19–27.*
3. *Борминский С.А. Портативные электронно-акустические устройства измерения уровня жидких сред: автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Самара: СГАУ, 2006.*
4. *Sharp D.B. Acoustic pulse reflectometry for the measurement of musical wind instruments. — University of Edinburgh, 1996. — 192 p.*
5. *Gray C.D. Acoustic Pulse Reflectometry for Measurement of the Vocal Tract with Application in Voice Synthesis: a thesis submitted in fulfilment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy to the University of Edinburgh. — University of Edinburgh, 2005. — 252 p.*
6. *Пат. 2175526 Рос. Федерация, МПК А61В 8/12, G01В17/00, G01N 29/00. Устройство и способ для рефлектометрических обследований и измерений полостей/ С.Б. Расмуссен; заявл. 14.11.1995; опубл. 10.11.2001, Бюл. № 31.*
7. *Pat. 2003/0034035 USA, А61М 16/00. Determining Endotracheal Tube Placement Using Acoustic Reflectometry/ D.T. Raphael; applied: 14.08.2002; published: 20.02.2003.*
8. *Pat. 03/015610 WIPO (International), А61В. Determining Endotracheal Tube Placement Using Acoustic Reflectometry/ D.T. Raphael; applied: 14.08.2002; published: 27.02.2003.*
9. *Pat. 5902252 USA, А61В 5/12. Device and Process for Measuring Acoustic Reflectance/ R.G. Hohlfeld, G. Jenkins; applied: 23.01.1998; published: 11.05.1999.*
10. *Pat. 2010/0087751 USA, А61В 5/00. Acoustic Reflectometry Instrument and Method/ D.P. Warner; applied: 03.10.2008; published: 08.04.2010.*
11. *Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений. URL: https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/4/items/377153/ (дата обращения: 11.11.2019).*
12. *Физическая акустика. Т. 1. Ч. А: Методы и приборы ультразвуковых исследований/ под ред. У. Мэзона. — М.: Мир, 1966. — 592 с.*
13. *Инишаков Д.В., Кузнецов К.А. Применение метода акустической импульсной рефлектометрии для оценки технического состояния трубных пучков теплообменников// Оценка и управление промышленными рисками в промышленной безопасности. Мониторинг рисков сложных и уникальных объектов: сб. материалов VI Школы-семинара (24 авг. 2016). — Омск: типография «Золотой тираж», ООО «Омскбланкиздат», 2016. — С. 124–131.*

14. Хасанова А.Ф., Галлямов М.А., Закирова З.А. Повышение эффективности теплообменных процессов на производстве// Безопасность труда в промышленности. — 2017. — № 12. — С. 18–21.

d.inshakov@hm.irk.ru

Материал поступил в редакцию 12 ноября 2019 г.

«Bezopasnost Truda v Promyshlennosti»/ «Occupational Safety in Industry», 2019, № 12, pp. 24–29.  
DOI: 10.24000/0409-2961-2019-12-24-29

**Diagnostics of the Technical Condition of Heat Exchangers Using the Method of Acoustic Pulse Reflectometry at Hazardous Production Facilities**

D.V. Inshakov, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Lead Engineer — Designer, d.inshakov@hm.irk.ru

K.A. Kuznetsov, Cand. Sci. (Eng.), First Deputy General Director

AO IrkutskNIIhimmash, Irkutsk, Russia

**Abstract**

Diagnostics of the technical condition of heat exchangers tube bundles at hazardous production facilities during the period of shutdown maintenance is considered in the article. Possible approaches to solving the problem associated with the limited time for examination, the large total length of the tubes in bundles and the vagueness of the diagnostic features of tubes defectiveness are analyzed. Use of the traditional methods of non-destructive testing, including endoscopy, does not allow to perform control of the technical condition of heat exchanger tubes. Relatively recently, for the examination of the internal clearance of small-diameter pipes, the method of acoustic pulse reflectometry, known in science and technology, was used. PAKT-04 device was produced for express- inspection of heat exchangers. This method was implemented in the device. Experience of using the device is presented. The principle of acoustic pulse reflectometry and the characteristics of the device are reviewed in brief. The features of defects on the reflectogram and masking their interference are shown. It is proposed for characterizing the wear of the tubes to introduce a generalized quantitative parameter called the «defectiveness degree». This parameter considers the degree of erosion of the inner wall, presence of deposits, blockages, holes. It is determined by the change of signal propagating in the tube. The value of defectiveness degree indicates the applicability of the tube for operation in the heat exchanger. Examples are demonstrated related to tubes wear and the value of this parameter. The results of measuring the parameter on different heat exchangers are discussed.

**Key words:** technical diagnostics, acoustic pulse reflectometry, piping systems, heat exchangers.

**References**

1. Amir N., Barzelay O., Yefet A., Pechter T. Condenser tube examination using acoustic pulse Reflectometry. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. 2010. Vol. 132. pp. 014501:1–014501:5.

2. Inshakov D.V., Bykov S.P., Kuznetsov K.A. PAKT-04: Device and Non-Destructive Testing of Heat-Exchange Equipment. Scientific Israel — Technological Advantages. 2016. Vol. 18 (1). pp. 19–27.

3. Borminskiy S.A. Portable electronic-acoustic devices for measuring the level of liquid media: Abstract of the thesis... Candidate of Technical Sciences. Samara: SGAU, 2006. (In Russ.).

4. Sharp D.B. Acoustic pulse reflectometry for the measurement of musical wind instruments. University of Edinburgh, 1996. 192 p.

5. Gray C.D. Acoustic Pulse Reflectometry for Measurement of the Vocal Tract with Application in Voice Synthesis: a thesis submitted in fulfilment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy to the University of Edinburgh. University of Edinburgh, 2005. 252 p.

6. Rasmussen S.B. Patent RF. № 2175526. MPK A61B 8/12, G01B17/00, G01N 29/00. Device and method for reflectometry examinations and measurements of cavities. Applied: November 14, 1995. Published: November 10, 2001. Bulletin № 31.

7. Raphael D.T. Patent USA № 2003/0034035, A61M 16/00. Determining Endotracheal Tube Placement Using Acoustic Reflectometry. Applied: August 14, 2002. Published: February 20, 2003.

8. Raphael D.T. Patent № 03/015610 WIPO (International), A61B. Determining Endotracheal Tube Placement Using Acoustic Reflectometry. Applied: August 14, 2002. Published: February 27, 2003.

9. Hohlfeld R.G., Jenkins G. Patent USA № 5902252, A61B 5/12. Device and Process for Measuring Acoustic Reflectance. Applied: January 23, 1998. Published: May 11, 1999.

10. Warner D.P. Patent USA № 2010/0087751, A61B 5/00. Acoustic Reflectometry Instrument and Method. Applied: October 03, 2008. Published: April 08, 2010.

11. Federal information fund for ensuring uniformity of measurements. Available at: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/4/items/377153/> (accessed: November 11, 2019). (In Russ.).

12. Mezon U. Physical acoustics. Vol. 1. Pt. A: Methods and instruments of the ultrasonic examinations. Moscow: Mir, 1966. 592 p. (In Russ.).

13. Inshakov D.V., Kuznetsov K.A. Use of acoustic pulse reflectometry for assessment of technical condition of heat exchangers tube bundles. *Otsenka i upravlenie industrialnymi riskami v promyshlennoy bezopasnosti. Monitoring riskov slozhnykh i unikalnykh obektov: sb. materialov VI Shkoly-seminara (24 avg. 2016)* (Assessment and management of industrial risks in industrial safety. Monitoring of risks of the complex and unique objects: Digest of the VI School-Seminar (August 24, 2016). Omsk: tipografiya «Zolotoy tirazh», OOO «Omskblankizdat», 2016. pp. 124–131. (In Russ.).

14. Khasanova A.F., Gallyamov M.A., Zakirova Z.A. Increase of Heat Exchange Processes Efficiency at Production Site. *Bezopasnost Truda v Promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*. 2017. № 12. pp. 18–21. (In Russ.).

Received November 12, 2019