

УДК: 681.128.8(088.8)

OECD: 2.03

## Моделирование дистанционного мониторинга твердых остатков нефтепродуктов в резервуарах

Колыхалин В.М.

Ведущий специалист научно-конструкторского управления Санкт-Петербургского филиала АО «Атомэнергопроект» - «Санкт-Петербургский проектный институт», г. Санкт-Петербург, РФ

### Аннотация

Приводятся исследование и аппаратная реализация системы акустического мониторинга объема остатков нефтепродуктов на основе волновой модели звукового поля в накопительных резервуарах нефтяных терминалов. Предлагаются результаты компьютерного и физического моделирования процессов звукопередачи акустических колебаний при возбуждении акустических колебаний воздушного объема ударным источником с различной дислокацией для диагностики объемов (массы) твердых остатков нефтепродуктов в цилиндрических резервуарах. Метод нормирования интенсивности акустических колебаний относительно известного воздушного объема (пустого резервуара) является вполне приемлемым подходом к реализации экспресс-регистрации объема остатка и обладает достаточной точностью для предварительной оценки экономических потерь при погрузке танкеров нефтепродуктами. Обосновывается практическое использование метода акустической регистрации объемов твердых остатков нефтепродуктов при разработке задач надежно-ориентированного технического обслуживания оборудования с применением методологии RCM, предполагающей проведение анализа степени критичности элементов для обеспечения безопасности, производительности и экономической эффективности эксплуатации нефтяного терминала. Предлагаемые бесконтактные методы акустической регистрации объемов твердых и жидких нефтепродуктов, сыпучих и смешанных агрегатных композиций, не исключая и ядерные отходы, могут найти применение в средствах воздушного и водного транспорта.

**Ключевые слова:** интенсивность, остаток нефтепродуктов, микрофон, резервуар, надежно-ориентированный, RCM.

### *Modeling of distant monitoring of solid residual oil products in tanks*

*Kolykhalin V.M.*

*Leading Specialist, Scientific and Design Department, St. Petersburg Branch of JSC Atomenergoproekt - St. Petersburg Design Institute, St. Petersburg, Russia*

### **Abstract**

*The research and hardware implementation of the system of acoustic monitoring of the volume of residual petroleum products based on the wave model of the sound field in the storage tanks of oil terminals are presented. The results of computer and physical modeling of the sound transmission processes of acoustic oscillations in the excitation of acoustic vibrations of the air volume by a shock source with different dislocation for the diagnosis of the volume (mass) of solid residual oil products in cylindrical tanks are proposed. The method of standardization of acoustic oscillations intensity concerning the known air volume (empty tank) is*

a quite acceptable approach to the realization of express-registration of residue volume and has a sufficient accuracy for the preliminary estimation of economic losses of tanker loading with oil-products. The practical use of the acoustic registration method of solid residues volumes of oil products in the development of tasks of reliability-oriented maintenance of equipment with the use of RCM methodology, involving the analysis of the degree of criticality elements to ensure safety, productivity and economic efficiency of oil terminal operation is substantiated. The proposed non-contact methods of acoustic registration of volumes of solid and liquid oil products, bulk and mixed aggregate compositions, not excluding nuclear waste, can find application in means of air and water transport.

**Keywords:** intensity, oil residue, microphone, tank, reliability-oriented, RCM.

## Введение

Существующая практика контроля объема товарных нефтепродуктов (н/п), смеси с водой и другими реагентами в накопительных резервуарах нефтяных терминалов базируется, как правило, на дистанционном мониторинге посредством радиолокационных приборов (радаров), сканирующих уровень плоских поверхностей жидких н/п. Здесь, в целом для диагностики объема нефтепродуктов, используется комплексная информация с трех полевых приборов: многозонного термометра, датчика давления, датчика уровня - радара с непрерывной регистрацией и коррекцией показаний во времени для абсолютных измерений в стабильных условиях эксплуатации с безопасной клапанной герметизацией. Однако, для регистрации объемов твердого остатка (шлама) в накопительных резервуарах нефтяных терминалов и при значительных изменениях плотности, влажности, температуры такие системы не пригодны [1, 2].

Здесь сложность практической реализации мониторинга твердых остатков н/п обусловлена тем, что на точность измерений существенно влияют технологические особенности: повышение температуры нефтепродуктов от  $0^{\circ}\text{C}$  до  $+70^{\circ}\text{C}$ , сопровождающееся испарением легких фракций и воды (пар); изменение температуры окружающей среды от  $-20^{\circ}\text{C}$  до  $+30^{\circ}\text{C}$ ; соответствующие изменения плотности нефтепродукта при повышенных и пониженных температурах и т.д.

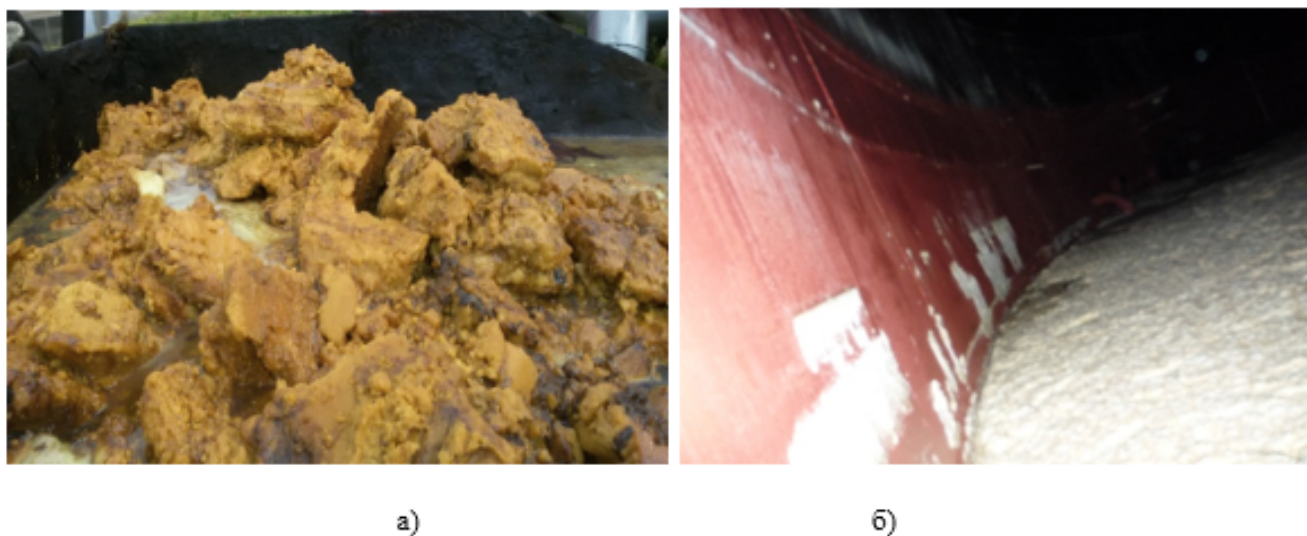


Рис. 1. Твердый остаток нефтепродуктов в накопительном резервуаре: а) компаунда масел смазочных (КМС), б) дизельного топлива в зимнее время

В то же время технические средства, особенно на основе относительных акустических измерений объема (массы) нефтепродуктов по «свободному» воздушному объему путем определения, например, уровня интенсивности с меньшей точностью, чем радарные (линейные), но с нивелированием влияния переменных внешних и внутренних технологических условий либо не разработаны вообще, либо находятся в стадии первоначальных исследований [3, 4].

### 1. Мониторинг объемов твердых остатков нефтепродуктов методом интенсиметрии

Целью настоящей работы является разработка и экспериментальная проверка способа технического контроля объемов твердых остатков нефтепродуктов в транспортных резервуарах на основе волнового подхода фундаментальной теории акустически. Так в области высоких частот, особенно для радиальных мод, наблюдается высокая плотность спектра, что означает слабую избирательность резервуара для высокочастотных составляющих первичного сигнала. В то же время на низких частотах преобладают аксиальные моды с достаточной энергией, но с незначительной плотностью спектра, что является основной особенностью резервуаров больших объемов и на низких частотах.

До настоящего времени оценка акустических условий в замкнутых пространствах различного назначения в основном базируется на аналитических расчетах и измерениях времени реверберации. Однако, в ряде случаев возникает необходимость определения частотной (спектральной) характеристики звукопередачи энергетической суммы прямого и отраженного звуков при возбуждении сигналов малой длительности (импульс  $\delta$ -функции Дирака) [5-7]. Основной сложностью получения такой зависимости с использованием преобразования Фурье (БПФ) является учет перехода от обычной периодической частоты электрических колебаний  $f_э$ , подводимых к электроакустическому преобразователю ( $f_э = 1/T$ , где:  $T$  – период колебаний), к пространственной частоте ( $f_a = c/l$ , где:  $c$  – скорость звука,  $l$  – линейный или другой пространственный размер замкнутого пространства).

Интенсивность звука, определяемая как среднее значение звуковой энергии, проходящей в единицу времени через единицу площади, может быть выражена формулой

$$I_r = \frac{1}{T} \int_0^T p(t)v(t)dt, \quad (1)$$

где  $I_r$  – интенсивность звука в направлении  $r$  в некоторой точке между приемниками,  $p(t)$  – мгновенное значение звукового давления в этой точке,  $v(t)$  – мгновенное значение скорости частиц в направлении  $r$ ,  $T$  – время измерения.

Колебательная скорость частиц по направлению  $r$ , определяемое линией, на которой расположены микрофоны, выражается формулой:

$$v_r(t) = \frac{1}{\rho} \int \frac{\partial p}{\partial r} dt \approx \frac{1}{\rho} \int \frac{p_2(t) - p_1(t)}{\Delta r} dt, \quad (2)$$

где  $\rho$  – плотность воздуха,  $p_1(t)$  и  $p_2(t)$  – мгновенные значения, измеренные двумя микрофонами-приемниками звукового давления в двух точках, расстояние между которыми равно  $\Delta r$ .

Давление в этой средней точке между двумя точками измерения приближенно равно:

$$p(t) \cong \frac{p_1(t) + p_2(t)}{2} dt. \quad (3)$$

Интенсивность звука в направлении  $r$  в средней точке между двумя микрофонами можно найти путем интегрирования произведения  $p(t)$  и  $v(t)$ , исходя из уравнений (1), (2) и (3), с помощью анализатора интенсивности звука. Известно, что метрологические возможности метода акустической интенсиетрии при определении акустических характеристик объектов широко применяют при экспериментальных исследованиях [8-10].

## 2. Компьютерное моделирование акустического поля в резервуаре

Компьютерное моделирование применения метода интенсиетрии (программа «Comsol»), полученного для различных объемов остатков нефтепродуктов, представлено на рисунке 2: график  $L5$  соответствует остатку, примерно равному 3% от общего объема резервуара, далее  $L4 \dots L1$  соответствуют увеличению объема остатка с шагом примерно 3%. По оси абсцисс отложено время (с), по оси ординат – нормированный уровень интенсивности  $\Delta N$ .

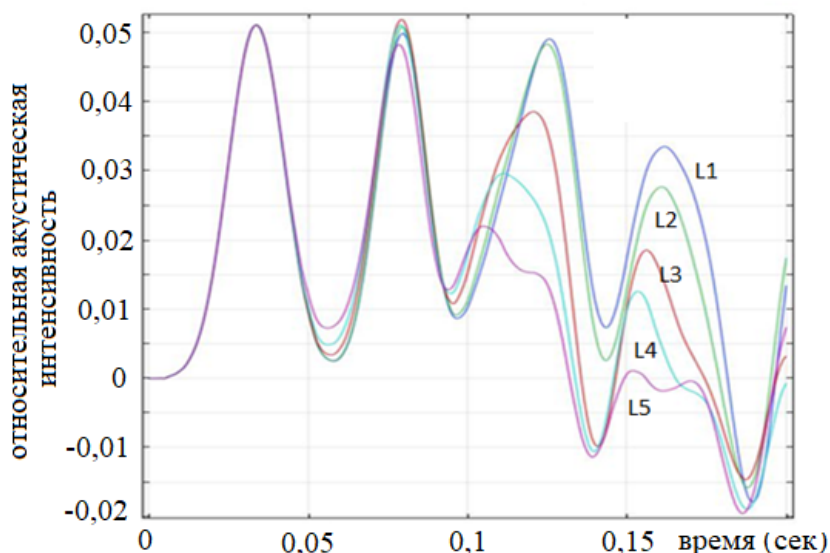


Рис. 2. График зависимости амплитуды нормированного уровня интенсивности от времени (с)

Соответствующие характерные отличия графиков  $L1 - L5$  в частотной области представлены на рисунке 3. По оси абсцисс отложена частота (Гц), по оси ординат – нормированный уровень интенсивности. Здесь в явном виде проявляется резонанс второй аксиальной моды на частоте  $f = 25$  Гц.

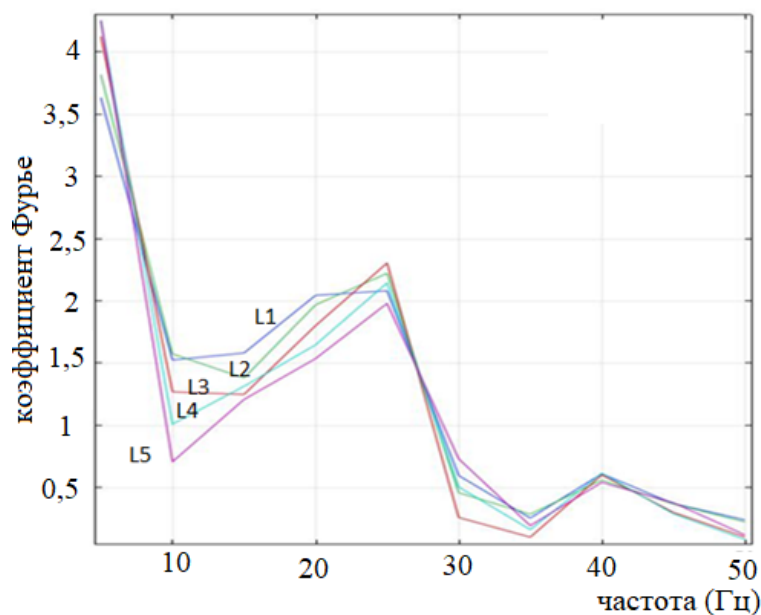


Рис. 3. График зависимости амплитуды нормированного уровня интенсивности от частоты (Гц)

Наличие автономного источника звуковых колебаний (удар) позволяет применить более точный объективный контроль объема, в том числе и дистанционный. Контролируется  $\Delta N$  — относительный (например, к «пустому» резервуару) уровень интенсивности при разных объемах  $V_i$  твердого остатка нефтепродуктов посредством анализатора интенсивности 2134 фирмы В&К (Дания).

Поскольку интенсивность звука содержит информацию как о величине, так и о направлении, она весьма эффективна при исследовании распределения потоков звуковой энергии — в нашем случае у поверхности импедансного днища резервуара. Особенность диаграммы направленности акустического зонда анализатора интенсивности (В&К), позволяет четко регистрировать изменения звукопоглощения днища вертикального цилиндрического резервуара по изменению амплитуды второй аксиальной моды колебаний воздушного объема резервуара в спектре интенсивности.

### 3. Физическое моделирование акустического поля в резервуаре

Для ослабления возможного воздействия внешнего (фонового) шума и помех измерительная установка размещалась в специальной полузаглушенной (с отражающим полом) комнате кафедры акустики СПбГУКиТ сравнительно небольших размеров:  $4 \times 3,5$  м в плане и без окна. Стенки и потолок обработаны достаточно эффективным звукопоглотителем из перфорированных плит АГШ с зазором 0,1 м, заполненным минеральной ватой так, что высота подвесного потолка составила 2,5 м. Данная акустическая обработка с имеющейся звукоизоляцией обеспечила время реверберации в диапазоне 125...4000 Гц около 0,4 с при проникающем интегральном уровне шума не более 30 дБ, начиная с полосы 31,5 Гц.

Измерительная установка состояла из модели резервуара в масштабе М 1:10, ударного устройства для возбуждения колебаний (громкоговорителя), анализатора спектра интенсивности 2134 фирмы В&К с фиксацией результатов в специальной программе компьютера (рис. 4а).

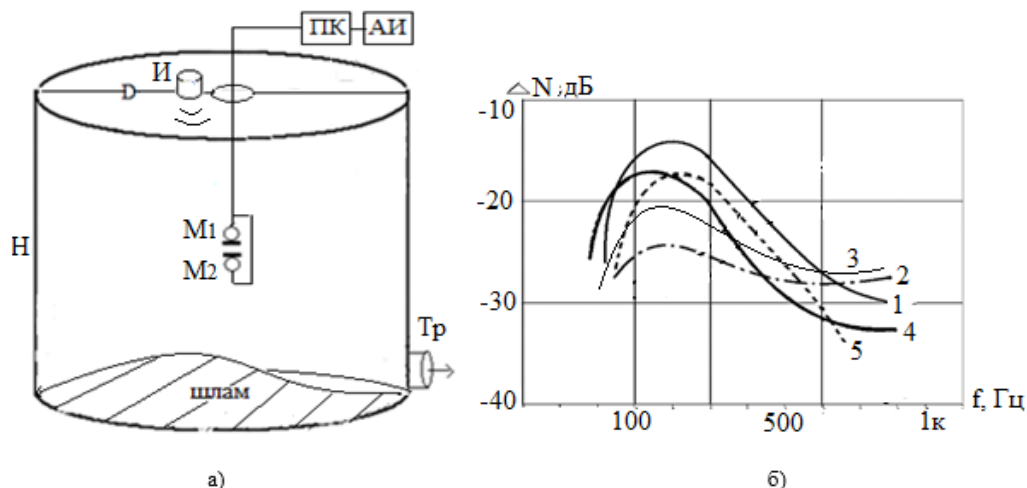


Рис. 4. а) Схема модели измерений объема остатка (шлама):  $M_1$  и  $M_2$  – микрофоны акустического зонда, ПК – компьютер, АИ – анализатора интенсивности, И – ударный источник колебаний,  $H = 1$  м – высота,  $D = 0,7$  м – диаметр;  $T_p$  – бункеровочный патрубок; б) усредненные огибающие спектров уровня интенсивности

Анализатор спектра интенсивности 2134 фирмы В&К (Дания) в реальном масштабе времени определял уровни интенсивности звука в третьоктавных полосах в диапазоне от 1,6 Гц до 20 кГц. Результаты измерений и анализа отображаются на экране ЭЛТ устройства индикации 4715 и выдаются на внешнюю цифровую аппаратуру (рис. 5). По оси ординат отложен относительный уровень интенсивности (дБ), по оси абсцисс отложена частота (Гц).

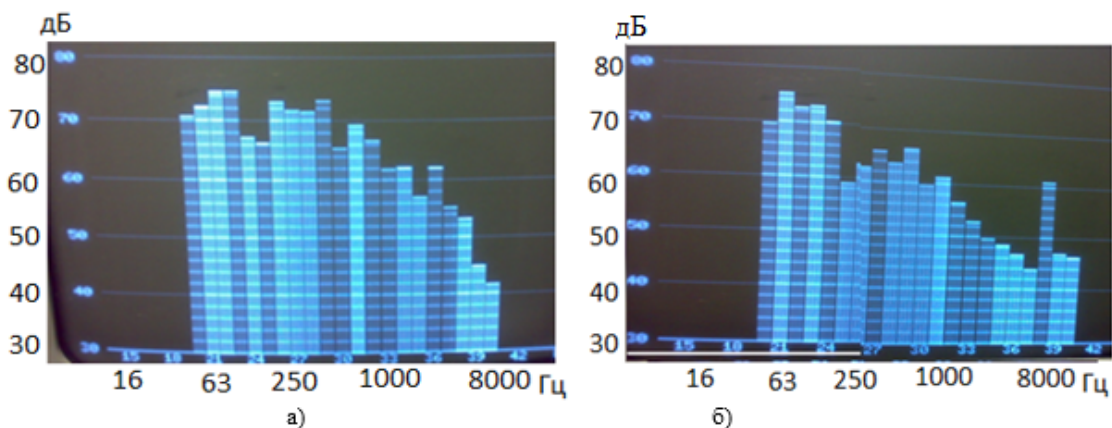


Рис. 5. Фото с устройства индикации 4715 В&К результатов измерений уровней интенсивности: (а) для «пустого» резервуара, (б) заполненного остатком нефтепродукта на 3 % общего объема модели

«Темные» полосы спектра – активная составляющая интенсивности – сигнализируют о том, что источник звуковых колебаний находится впереди зонда. «Светлые» полосы спектра – реактивная составляющая интенсивности – сигнализируют о том, что мультипликативная помеха находится сзади измерительного зонда. По результатам 5 измерений уровней интенсивности различных объемов остатка (с шагом 3% к увеличению от «пустого») были построены усредненные огибающие спектров уровней интенсивности (рис.4 б): позиция 1 соответствует пустому РВС, позиция 2 соответствует

заполнению PBC на 3%, позиция 3 соответствует заполнению PBC на 6% ... п. 5 соответствует заполнению на 12%.

#### 4. Регрессионно-корреляционный анализ модельных измерений

С целью демонстрации монотонности связи между параметрами диагностическим (уровень интенсивности) и состояния  $V_i$  (объем твердого остатка н/п) ниже приводится регрессионно-корреляционный анализ:

- исследуется зависимость результативной переменной (уровень интенсивности) и факторной переменной (объем твердого остатка н/п);
- предлагаются формула и график, по которым возможно прогнозировать значения  $V_i$  объемов твердого остатка н/п на основе известных измеренных уровней интенсивности.

Для пополнения статистики результатов модельных измерений, необходимой для выполнения регрессионно-корреляционного анализа, выбираются значения  $V_i$  и соответствующие им значения уровней интенсивности из спектра интенсивности (третьоктавного частотного диапазона с центральной частотой 250 Гц).

На начальном этапе проводилась первичная обработка данных и фильтрация «выбросов» (значения, которые существенно отличаются других в выборке). Визуально определенный по рисунку 4б один «выброс» был исключен из статистики для дальнейшего анализа — уровень интенсивности для пустого резервуара.

Таблица 1

Данные модельных измерений зависимости уровня интенсивности от объема твердого остатка н/п

Объемом твердого остатка н/п $V_i$ , м <sup>3</sup>	Уровни интенсивности звука по 2134 В&К, дБ
0,006	58
0,011	60
0,016	63
0,023	65
0,030	68
0,033	70
0,039	72
0,043	74

Линейная математическая модель регрессии представлена на рис.6.

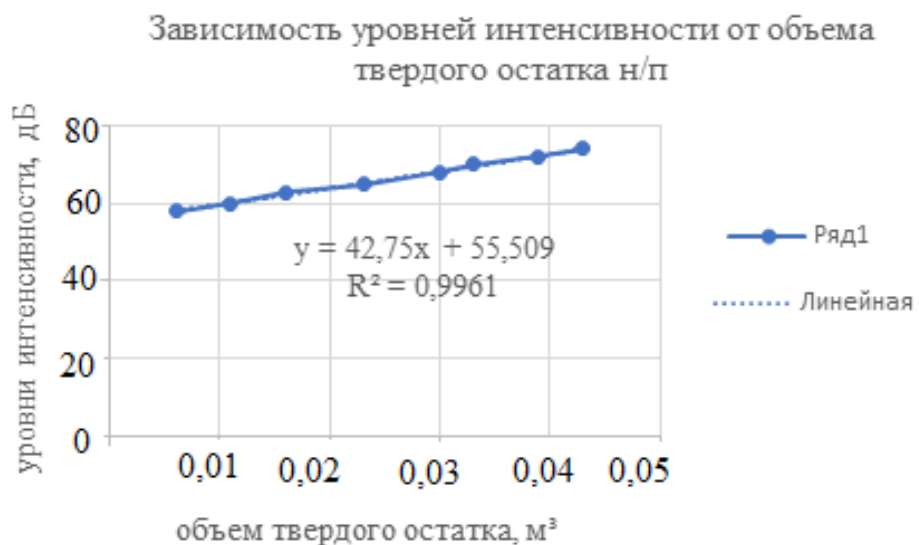


Рис. 6. Линейная математическая модель регрессии

Величина достоверности аппроксимации  $R^2$  у формулы на вышеприведенном рисунке наибольшая по сравнению с другими, выражающих экспоненциальную ( $R^2 = 0,9948$ ), логарифмическую ( $R^2 = 0,9335$ ), степенную ( $R^2 = 0,9483$ ) и др. зависимости. Регрессионная прямая достаточно точно описывает общую тенденцию изменения уровней интенсивности от объема твердого остатка н/п  $V_i$ .

### 5. Практическое применение метода акустической регистрации объемов твердых остатков нефтепродуктов

Техническое обслуживание и ремонт (ТОиР) элементов оборудования производственного объекта является дорогостоящим и постоянно действующим видом деятельности, поэтому необходимо контролировать его объем и расходы, оптимизировать эффективность. В международной практике по оптимизации ТОиР концепция технического обслуживания (ТО) основана на предупредительном, прогнозном и корректирующем обслуживании [11, 12].

Надежно-ориентированное техническое обслуживание (RCM - Reliability Centered Maintenance) является одним из наиболее распространенных систематических методов, позволяющий анализировать безотказность не только отдельных элементов и систем, но обеспечивает переоценку технического обслуживания (оптимизацию) всех элементов оборудования с требуемым качеством и возможностью оценки влияния изменений на безопасность, функциональную эффективность и экономичность эксплуатации [13].

Внедрение методологии RCM в АО «Петербургский нефтяной терминал» (ПНТ) обусловлено необходимостью достижения следующих целей:

- повышение безотказности элементов;
- установление оптимального состава работ по ТОиР элементов;
- выявление неэффективных работ по ТОиР;
- обоснование периодичности ТО;
- определение оптимальных стратегий ТОиР;
- обоснование необходимых ресурсов ТОиР.

Подход по оптимизации ТОиР основан на процессе определения применимых стратегий технического обслуживания для систем и оборудования с целью предотвращения



потенциальных отказов или оптимального управления видами отказов.

Для каждого вида отказов элементов определяется наиболее подходящий способ управления безотказностью (стратегия ТО): применение ТОиР по техническому состоянию, плановый предупредительный ремонт, плановая замена, применение комбинации из перечисленных выше стратегий и применением только корректирующего ремонта (по факту отказа). Выбор в пользу конкретной стратегии проводится на основании соблюдения баланса между безопасностью и экономической эффективностью. При выборе конкретной стратегии ТОиР безопасность нефтяного терминала является наивысшим приоритетом.

RСM-анализ обосновывает целесообразность и выполнимость оптимизации работ по ТОиР, учитывая следующие целевые ориентиры:

- повышения безопасности ПНТ в результате повышения безотказности функционально-критических элементов за счет увеличения затрат на ТО;
- уменьшения затрат на ТО некритических элементов и элементов, работа которых не предполагает ТО и допустима до отказа.

Поэтому одной из основных задач RСM-анализа является определение перечня критических компонентов на основе инженерного анализа опыта эксплуатации аналогичного оборудования и личных компетенций экспертов RСM:

- *критические* компоненты, отказ которых может привести к невыполнению важной функции системы ПНТ и связан с неприемлемым повышением риска;
- *некритические* компоненты, отказ которых не приводит к значительным последствиям, но оптимизация ТОиР целесообразна по экономическим или другим причинам;
- *эксплуатируемые до отказа* – компоненты, для которого риски и последствия отказа приемлемы без какого-либо диагностического или периодического обслуживания, работают до тех пор, пока не потребуется ремонт.

При выполнении инженерного анализа классический научно-нагруженный FMECA (Failure Mode and Effects Critical Analysis) заменяется единым списком вопросов, направленных на рассмотрение связи между отказами оборудования и функциональным отказами ПНТ, проявляющимися на самых высоких уровнях.

В данной статье рассматривается способ внедрения на ПНТ одного из основных оптимизационных методов RСM-анализа: отказ от планового предупредительного ремонта (ППР) некритического элемента бункеровочной системы нефтепродуктов (н/п) – РВС (резервуар вертикальный стальной) и замена на более экономичное прогнозное ТО по техническому состоянию.

При анализе функциональных отказов системы определяется перечень отказов элементов, приводящих к невыполнению или деградации функции системы, вероятные причины отказов (механизм отказа), их критичность и последствия [14].

Функцией бункеровочной системы является обеспечение непрерывной погрузки-разгрузки н/т из резервуаров хранения на морские танкеры. В качестве одного из основных инструментов RСM-анализа применяется матрица риска отказа элементов. Входными данными для построения матрицы риска, являются: экспертная оценка значимости элементов; тяжесть последствий их отказов и частота отказов элементов предоставляются из опыта эксплуатации морских терминалов-аналогов. На основании данных матрицы риска определяется перечень некритических элементов бункеровочной системы ПНТ, для которых целесообразно рассмотреть возможность замены ППР элемента на обслуживание по техническому состоянию (рис. 7). По оси абсцисс отложен результат экспертного анализа тяжести последствий отказа по влиянию на безопасность, производительность и экономичность. По оси ординат отложены категории риска,

экспертно оцененные на основе данных о частоте отказа и тяжести последствий из опыта эксплуатации.



Рис. 7. Матрица риска отказа элементов бункеровочной системы ПНТ

Для примера приводятся упрощенный алгоритм и результат RCM-анализа некритического элемента бункеровочной системы – РВС. Одним из опасных отказов РВС, по опыту эксплуатации, может быть засорение бункеровочного патрубка РВС из-за отложения шлама на днище. Такой вид отказа РВС может привести к остановке грузовых операций, долговременным потерям производственных мощностей (например, недоступность причала ПНТ к погрузке), штрафные санкции за простой судна и нарушение логистики грузооборота и т. д. *События с значительными последствиями:* отказ вызывает инициирование системы пожаротушения; потерю герметичности цилиндрического корпуса резервуара, приводящей к разливу н/п; выброс нефтепродукта в окружающую среду через технологические отверстия в корпусе; экономические потери при длительной остановке грузовых операций, для которых ключевым является временной фактор. *События с незначительными последствиями:* экономические потери при кратковременной остановке грузовых операций

На основании статистической информации в таблице 2 приводятся вероятные причины опасного отказа – засорение бункеровочного патрубка РВС из-за отложения шлама на днище.

Таблица 2

Вероятные причины отказа - засорение бункеровочного патрубка РВС

Отказ	Засорение бункеровочного патрубка РВС, ДУ 600.
Прямая причина	Недостаточный разогрев н/п в ж/д цистерне при выгрузке в РВС; отсутствие дистанционного контроля объема твердого остатка.
Коренная причина	Высокая температура застывания н/п; наличие присадок в н/п, образующие осадок при транспортировке.
Факторы, влияющие на появление причин	1) материалы (застывание н/п в зимнее время при транспортировке в ж/д цистернах); 2) измерение (применяется только визуальный контроль); 3) среда (тяжелые погодные условия в зимнее время).
Действия, влияющие на факторы	Ошибки логистики.
Ключевые параметры процесса	Акустическим мониторинг достижение предельного значения интенсивности звуковых колебаний в РВС при возбуждении ударным источником.

На следующем этапе RCM-анализа обосновывается выполнимость и достаточность применение ТО РВС по техническому состоянию с применением данных мониторинга технического состояния элемента.

При внедрении ТО по техническому состоянию самая главная и сложная задача состоит в назначении и контроле наступления критериев предельного состояния (или критериев предотказного состояния). В существующей технологии ПНТ такую задачу возможно решить только средствами акустической диагностики. Методы диагностирования должны включать: диагностическую модель изделия; алгоритм диагностирования и программное обеспечение; правила измерения диагностических параметров; правила определения структурных параметров; правила анализа и обработки диагностической информации.

Проблема с безопасностью РВС (резервуар вертикальный стальной) возникает, когда один из критических параметров ухудшается со временем – увеличивается (объем твердого остатка н/п на днище) или уменьшается (свободный воздушный объем). РВС выводится из эксплуатации, когда уровень деградации параметра станет слишком большим для нормального функционирования.

Путем тщательной регистрации и моделирования зависимости деградации от времени можно с достаточной точностью определить наработку на отказ резервуара с целью своевременного вывода РВС в ремонт, минимизирую экономические потери.

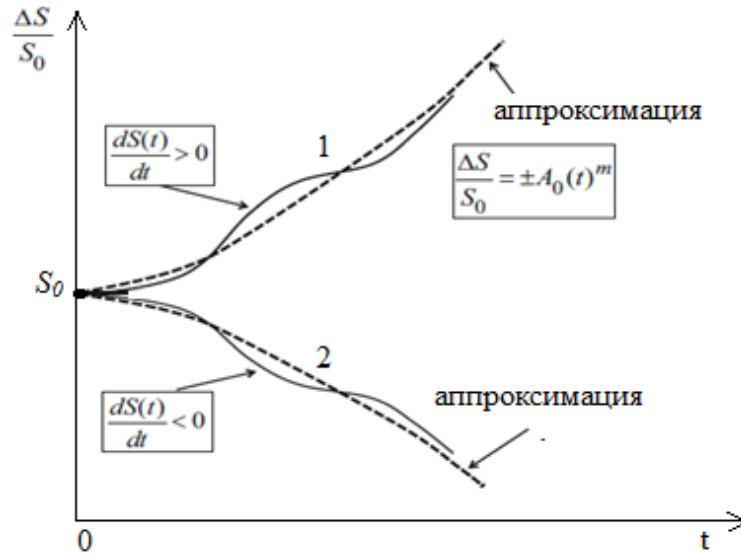


Рис. 8. Графики ухудшения критического параметра со временем: увеличение объема твердого остатка н/п 1 или уменьшение свободного воздушного объема резервуара 2

На рисунке 8 представлены графики ухудшения критического параметра со временем и их аппроксимирующие кривые: увеличение объема твердого остатка н/п (поз. 1) или уменьшение свободного воздушного объема резервуара (поз. 2). По оси абсцисс отложено время наблюдения за изменением критического параметра, по оси ординат отложено относительное текущее значение критического параметра.

Из опыта эксплуатации известно, что накопление твердого остатка происходит относительно медленно, тогда изменение критического параметра может быть представлено разложением Тейлора относительно  $t = 0$ , дающее ряд Маклорена:

$$S(t) = S_{t=0} + \left(\frac{\partial S}{\partial t}\right)_{t=0} t + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 S}{\partial t^2}\right)_{t=0} t^2 + \dots, \quad (4)$$

Предполагается, что члены высшего порядка в разложении (4) могут быть аппроксимированы введением некоторой функции, чтобы записать вышеприведенное разложение в сокращенном виде:

$$S(t) = S_0[1 \pm A_0 t^m], \quad (5)$$

где  $A_0$  — коэффициент, зависящий от физико-химических свойств н/п,  $m$  — регулируемый параметр.

При  $+A_0$  наблюдаемый параметр  $S$  монотонно увеличивается со временем, в то время как для  $-A_0$  он монотонно уменьшается с течением времени.

Рассмотрим критически параметр  $V_n$  — уменьшение свободного воздушного объема РВС в процессе накопления твердого остатка, которое может быть описано уравнением:

$$V_n = V_0(1 - A_0 t^m), \quad (6)$$

где  $V_0$  — воздушный объем РВС без остатка.

Перестановка членов в уравнении (6) и взятие логарифма обеих частей уравнения дает выражение:

$$\ln \left[ \frac{V_0 - V_n}{V_0} \right] = m \ln t + \ln A_0. \quad (7)$$

На основе данных опыта эксплуатации накопительного резервуара очистных сооружений АО «Петербургский нефтяной терминал» объемом 3000 м<sup>3</sup> для сбора розливов н/п после смыва с эстакад выгрузки железнодорожных цистерн, и расчетов по формуле (7), была составлена таблица 3. Статистические данные (первые два столбца таблицы) были оценены автором приближенно с помощью рулетки в процессе эксплуатации РВС.

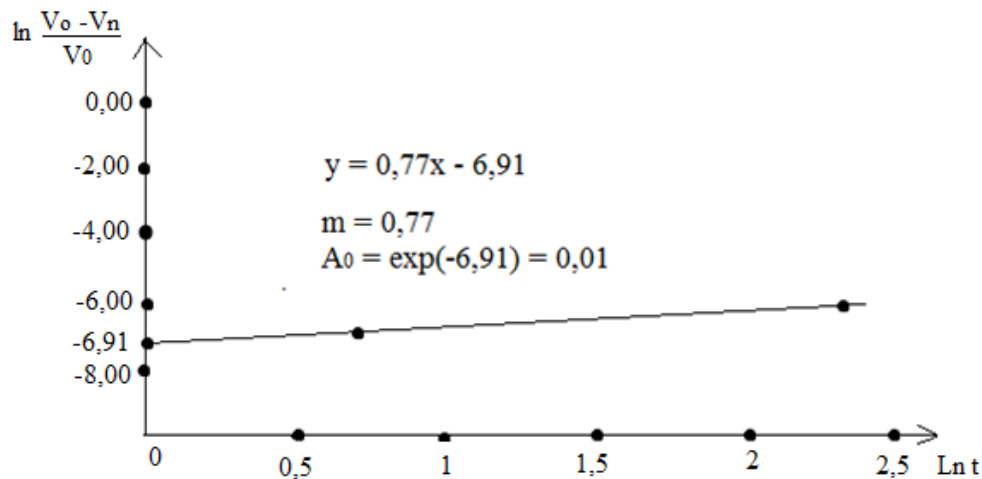
Таблица 3

Данные по уменьшению свободного воздушного объема РВС во времени

Время (месяц)	$V_n(\text{м}^3)$	$(V_0 - V_n)/V_0$	$\ln t$	$\ln[(V_0 - V_n)/V_0]$
0	3000			
1	2997	0,001	0	-6,91
2	2995	0,0017	0,693	-6,38
10	2992	0,0027	2,303	-5,92

Значение коэффициента  $A_0$  определяется из уравнения (7) при подстановке  $t = 1$ . Значение параметра  $m$  находится из уравнения (7) при подстановке  $t = 2$  и полученного  $A_0$ .

По данным таблицы 3 построен логарифмический график относительного уменьшения свободного воздушного объема РВС во времени (рис. 9), на котором представлено уравнение функции деградации (прямая в логарифмическом масштабе), параметр  $m$  и коэффициент  $A_0$ .

Рис. 9. График деградации критического параметра  $V_n$  резервуара

На основе расчетных данных получено уравнение, описывающее деградацию критического параметра  $V_n$  в зависимости от времени:

$$V_n = V_0(1 - A_0 t^m) = 3000(1 - 0,01 t^{0,77}) \quad (8)$$

Уравнение (8) позволяет получить приближенную оценку критического значения параметра  $V_n$  при подстановке прогнозируемого времени. Такие предварительные расчеты позволяют на самом раннем этапе мониторинга определить количественных значений параметров в точках 1 и 2 на рисунке 10, задающие предварительную продолжительность «окна вмешательства». По мере накопления статистических данных на отрезке «обнаружение изменения состояния» границы «окна вмешательства» актуализируются.



Рис. 10. Процесс деградации работоспособности РВС

По результатам физического моделирования акустического поля в резервуаре, рассмотренного выше, было построено «окно вмешательства» (рис. 10). По оси абсцисс отложено время наблюдения процесса деградации РВС по отказу: засорение бункеровочного патрубка РВС. По оси ординат отложены амплитудные значения относительного уровня интенсивности (дБ) в третьоктавной полосе с средней частотой 250 Гц (рис. 5), соответствующие различному объему твердого остатка н/п в РВС (на основе модельных измерений).

Принятие решения о ТОиР по факту деградации работоспособности РВС, с одной стороны, не должно быть преждевременным по экономическим причинам; с другой стороны — должно обеспечивать запас времени для планирования и выполнения мероприятий ТОиР — так называемое «окно вмешательства», при котором оборудование сохраняет свои функции, эффективность и безопасность ПНТ не снижаются.

При анализе процесса деградации РВС (см. рис. 10) возможно с достаточной точностью учитывать период развития отказа, постоянство интервала «окно вмешательства», возможность выполнить ТОиР при признаках ускоренной деградации работоспособности РВС.

## 6. Моделирование скорости деградации

Как было отмечено выше, критический параметр  $V_n$  уменьшается со временем, тогда уравнение (6) можно представить в следующем виде:

$$V^* = 1 - \frac{V_n}{V_0} = A_0 t^m. \quad (9)$$

Дифференцируя (9), получим скорость деградации  $R$ :

$$R = \frac{dV^*}{dt} = mA_0 t^{m-1}. \quad (10)$$

Для  $m = 1$  ожидается линейная зависимость деградации от времени. При  $m < 1$  наблюдается тенденция к насыщению деградации в течение длительного времени. Однако при  $m > 1$  деградация быстро возрастает со временем, что существенно затрудняет наблюдение за ее скоростью. Для  $m = 0,77$  из уравнения (8) скорость деградации РВС по критическому параметру  $V_n$ , как показано на рисунке 11, уменьшается со временем.

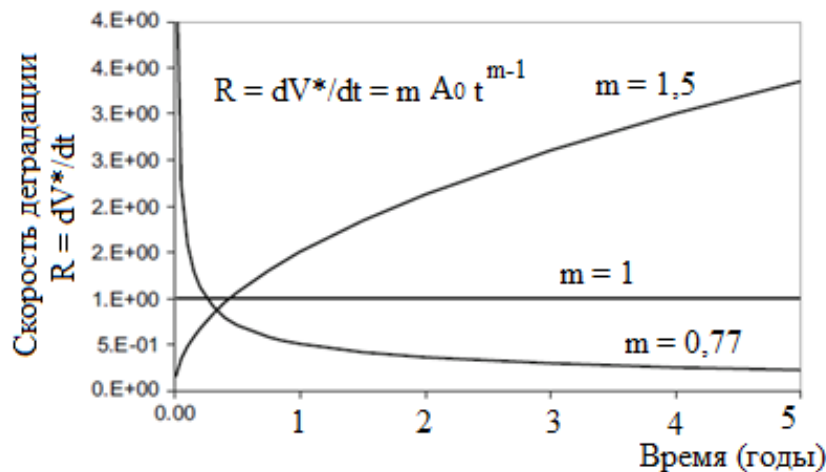


Рис. 11. Прогнозируемая скорость деградации  $V_n$ :  $m = 1$  соответствует постоянной скорости деградации,  $m > 1$  соответствует быстро возрастающей скорости деградации, при  $m < 1$  скорость деградации уменьшается

Время наработки на отказ ( $t_{от}$ ) устанавливается из опыта эксплуатации и актуализируется по мере накопления статистики (см.рис.10 п.3). Решая задачу о времени наработки на отказ, деградация  $V_n$  может быть описана с помощью уравнения (9) следующим образом:

$$t_{от} = \left[ \frac{1}{A_0} \left( \frac{V_0 - V_n}{V_0} \right) \right]^{1/m}. \quad (11)$$

Из уравнения (11) видно, что  $t_{от}$  уменьшается по мере увеличения критической величины  $V_n$ . Кроме того, время наработки на отказ увеличивается при уменьшении экспоненты  $m$ , и обращается в бесконечность при нулевом значении  $m$ , т.е. когда деградация во времени не происходит.

Из опыта эксплуатации известно, что критический слой твердого остатка на днище РВС составляет примерно 0,5...0,7 м по вертикали для  $V_0 = 3000 \text{ м}^3$ . Тогда начало перекрытия твердым остатком выходного бункеровочного патрубка РВС (см. рис. 4а) соответствует уменьшению  $V_n$  примерно на 4 %. Ожидаемое время наработки на отказ вычисляется из (11) следующим образом:

$$t_{от} = \left[ \frac{11}{0,01} \left( \frac{3000 - 0,96 \cdot 3000}{3000} \right) \right]^{1/0,77} = 4,2. \quad (12)$$

Таким образом, возможно предварительно оценить время наступления отказа РВС по причине засорения бункеровочного патрубка твердым остатком н/п через 4,2 года. Такой расчет крайне важен для позиционирования точки 3 на графике деградации РВС (см. рис. 10). По мере накопления статистических данных параметры функционального отказа и «окна вмешательства» актуализируются и по соответствующим значениям относительных уровней интенсивности звуковых колебаний с достаточной точностью возможен мониторинг твердых остатков в РВС.

Как было выше показано, параметр деградации  $A_0$  зависит от физико-химического состава твердого остатка, что приводит к различным значениям  $t_{от}$ . Однако, существуют и другие важные свойства  $A_0$  — зависимость от температуры н/п, накапливаемого в РВС. Тогда связь между  $t_{от}$  и параметром деградации  $V_0$  определяется следующим образом:

$$t_{от} = \left[ \frac{1}{A_0(\Phi, T)} \cdot \frac{V_0 - V_n}{V_0} \right]^{1/m}, \quad (13)$$

где  $A_0(\phi, T)$  – параметр деградации  $A_0$ , зависящий от физико-химических свойств ( $\phi$ ) и температуры  $T$  твердого остатка.

Из уравнения (13) видно, что кинетика  $t_{от}$  может не иметь простой обратной зависимости от деградации (физико-химической и температурной), содержащейся в параметре деградации  $A_0(\phi, T)$ . Действительно, только для частного случая  $m = 1$  (постоянная скорость деградации), время наработки на отказ будет иметь простую обратную зависимость с параметром деградации  $A_0(\phi, T)$ . Анализ  $t_{от}$  для других  $m$  с параметром  $A_0(\phi, T)$  является сложной задачей, требующей наличие достаточной представительной статистики.

Возможна также конкуренция механизмов деградации в процессе эксплуатации РВС – один приводит к увеличению критического параметра  $V_n$ , а другой приводит к уменьшению  $V_n$ . Такое состояние возможно описать уравнением:

$$V_n = V_0(1 + A_0 t^{m_1})(1 - B_0 t^{m_2}), \quad (14)$$

где  $A_0$  – параметр деградации, зависящий от физико-химических свойств и температуры  $T$  одного вида твердого остатка,  $B_0$  – параметр деградации, зависящий от физико-химических свойств и температуры  $T$  другого вида твердого остатка.

Первый член справа уравнения (14) имеет тенденцию к увеличению параметра  $V_n$ , а второй член справа стремится к уменьшению параметра  $V_n$ .

Механизмы конкурируют между собой и могут приводить поочередно либо к максимуму, либо к минимуму относительной деградации воздушного объема  $V_n/V_0$ . Например, в начале процесса  $V_n/V_0$  увеличивается за счет увеличения воздушного объема РВС (уменьшения объема твердого остатка), поскольку изначально доминирует механизм увеличения, а затем, на более поздних стадиях, доминирует  $V_n/V_0$  убывающего воздушный объема.

Приведенный метод актуально использовать для разделения процесса мониторинга твердого остатка, например, компаунда масел смазочных (КМС) (см. рис. 1а) на ранние и поздние стадии деградации для периода лето-зима. Если в летний период доминирует процесс разогрева твердого остатка и превращения части его в жидкую фазу за счет замеса с КМС высокой температуры летнего сезона, тогда в зимнее время доминирует процесс накопления твердого остатка, имеющего температуру ниже температуры застывания.

## Заключение

Таким образом, метод интенсивности с использованием двухмикрофонной техники измерения является вполне приемлемым для реализации экспресс-регистрации объема твердого остатка нефтепродуктов и их композиции в резервуарах и обладает достаточной точностью для прогнозирования отказа – засорение бункеровочного патрубка РВС, снижение риска экономических потерь при погрузке танкеров, в том числе повышение безопасности ПНТ – резервирование системы аварийного останова насосов при аварийном переливе РВС при его наполнении из ж/д цистерн. Предлагаемый бесконтактный метод акустической регистрации объемов твердых и жидких нефтепродуктов, сыпучих и смешанных агрегатных композиций, не исключая и ядерные отходы, могут найти применение в средствах воздушного и водного транспорта.



### Список литературы

1. Monteiro M., Svet Y, Sandilands D., Tsysar S. Experimental investigations of various methods of sludge measurements in storage oil tanks//Advances in Remote Sensing. 2015. № 4. P. 119-137.
2. Venkopora V. Method and apparatus for automatic sediment or sludge detection, monitoring, and inspection in oil storage and other facilities. US Patent № 8452046, 2013.
3. Колыхалин В.М., Давыдов В.В., Способ определения объема остатка твердого нефтепродукта в железнодорожном вагоне-цистерне. Патент на изобретение РФ №2348015, М.Федерал. служ. по интелект. собст., петен. и товар. знакам, RU 2348015 С1, Заявл.2007, опубл. 27.02.2009 Бюл. № 6.
4. Геча В.Я., Либерман М.Ю., Шматков А.В. Исследование метрологической эффективности акустической интенсиметрии при определении характеристик комплексных акустических полей, формирующихся в производственных помещениях при испытаниях электродвигателей. Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ, Т. 162, №1, 2018.
5. Свет В.Д., Цысарь С.А. Особенности акустического профилирования донных отложений в больших нефтяных резервуарах. Акуст. журн. 64, № 1, 2018. С. 112-118.
6. Цукерников И.Е., Невенчанная Т.О., Тихомиров Л.А., Щурова Н.Е. Измерения звукоизоляции строительных изделий с помощью интенсиметрии. Сборник Трудов XXXIV сессии Российского акустического общества. Сборник трудов сессии. Москва, 2022. С. 519-527.
7. Зайцева Б. Д., Бородина И. А., Теплыха А. А., Семёнова А. П. Определение скорости и затухания акустической волны в жидкостях с различным акустическим импедансом с помощью акустического интерферометра. Акуст. журн. Т. 69. № 4, 2023.С. 438–445.
8. Вировлянский А.Л., Казарова А.Ю. Распределение интенсивности звукового поля в глубоком море в фазовом пространстве глубина–угол–время. Акуст. журн. Т. 69. № 5, 2023. С. 515–527.
9. Сидоров Д.Д., Петников В.Г., Луньков А.А. Широкополосное звуковое поле в мелководном волноводе с неоднородным дном// Акуст. журн. Т. 69. № 5, 2023. С. 608–619.
10. Голубев А.Ю., Потокин Г.А. Особенности применения интенсиметрии для определения мощности акустического излучения панели в поле аэродинамических пульсаций давления. Измерительная техника. 2018; (12). С. 51-55.
11. IEC 60300-3-11:2009 Надежность в технике. Техническое обслуживание, ориентированное на надежность.
12. EUR-23232 EN Модель управления сроком службы предприятия, включающая оптимизированную программу MS&I - вопросы безопасности и экономики, декабрь 2007.
13. IAEA-TECDOC-1590 Применение технического обслуживания, ориентированного на надежность, для оптимизации эксплуатации и технического обслуживания атомных электростанций, МАГАТЭ, Вена, 2007 г.
14. INPO. AP-913 Описание процесса обеспечения надежности оборудования. Описание процесса, 2013.

### References

1. Monteiro M., Svet Y, Sandilands D., Tsysar S. Experimental investigations of various methods of sludge measurements in storage oil tanks//Advances in Remote Sensing. 2015. № 4. P. 119-137.

2. Venkoporao V. Method and apparatus for automatic sediment or sludge detection, monitoring, and inspection in oil storage and other facilities. US Patent № 8452046, 2013.
3. Kolykhalin V.M., Davydov V.V. Sposob opredeleniya obema ostatka tverdogo nefteprodukta v zhelezodorozhnom vagone-cisterne. Patent na izobrenie RF №2348015, M.Federal. sluzh. po intellekt. sobst., peten. i tovar. znakam, RU 2348015 S1, Zayavl.2007, opubl. 27.02.2009 Byul. № 6.
4. Gecha V.Ya., Liberman M.Yu., Shmatkov A.V. Investigation of metrological efficiency of acoustic intensimetry in determining the characteristics of complex acoustic fields formed in industrial premises during testing of electric motors. Problems of electromechanics. Proceedings of VNIEM, Vol. 162, No. 1, 2018.
5. Svet V.D., Tsysar S.A. Features of acoustic profiling of bottom sediments in large oil reservoirs. Acoustic Journal, 64, no. 1, 2018. C. 112-118.
6. Tsukernikov I.E., Nevenchannaya T.O., Tikhomirov L.A., Shchurova N.E. Measurements of sound insulation of building products using intensimetry. Proceedings of the XXXIV session of the Russian Acoustic Society. Proceedings of the session. Moscow, 2022. C. 519-527.
7. Zaitseva B. D., Borodina I. A., Teplykha A. A., Semyonova A. P. Determination of the velocity and attenuation of the acoustic wave in liquids with different acoustic impedance using an acoustic interferometer // Acoust. journal. 2023. T. 69. № 4. C. 438-445.
8. Virovlyansky A.L., Kazarova A.Yu. Sound field intensity distribution in the deep sea in the depth-angle-time phase space // Acoust. journal. 2023. T. 69. № 5. C. 515-527.
9. Sidorov D.D., Petnikov V.G., Lunkov A.A. Broadband sound field in a shallow-water waveguide with an inhomogeneous bottom// Acoust. journal. 2023. T. 69. № 5. C. 608-619.
10. Golubev A.Yu., Potokin G.A. Peculiarities of application of intensimetry for determination of panel acoustic radiation power in the role of aerodynamic pressure pulsations. Measuring technology. 2018; (12): 51-55.
11. IEC 60300-3-11:2009 Dependability in technics. Reliability centered maintenance.
12. EUR-23232 EN A plant life management model including optimized MS&I program – Safety and economic issues, December, 2007.
13. IAEA-TECDOC-1590 Application of Reliability Centred Maintenance to Optimize Operation and Maintenance in Nuclear Power Plants, IAEA, Vienna, 2007.
14. INPO. AP-913 Equipment Reliability Process Description. Process Description, 2013.