

УДК: 681.128.8(088.8)

OECD: 2.03

Акустический мониторинг объема твердых остатков нефтепродуктов в железнодорожных цистернах с применением двухмикрофонной техники измерения

Колыхалин В.М.

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

Аннотация

Статья посвящена экспериментальным исследованиям акустического поля в воздушном объеме цилиндрической оболочки с различным объемом твердых остатков мазута и дизельного топлива. Целью экспериментальных исследований акустического поля, возбуждаемого в воздушном объеме резервуара с помощью удара, является оценка объема твердого остатка нефтепродукта в торцевых частях железнодорожных цистерн с применением двухмикрофонной техники измерения. Моделируются собственные частоты колебаний воздуха в резервуаре, рассматривая его стенки абсолютно жесткими, а поверхность остатка импедансной. Компьютерное моделирование акустического поля, корреляционное взаимодействие первых отражений (от импедансной поверхности твердого остатка и абсолютно жестких стенок цистерны) позволяет визуально оценить как поглощающие свойства остатка, так и рациональное позиционирование пары идентичных микрофонов в резервуаре. Приводятся результаты физического моделирования, которые, как предполагается, могут быть использованы в натурных условиях для регистрации остатков нефтепродуктов в передвижных резервуарах на теплоэлектроцентралях (ТЭЦ), терминалах и других объектах отраслей энергетики. Исследованная бесконтактная система акустического мониторинга может найти применение для регистрации объема жидких, сыпучих и смешанных агрегатных композиций, не исключая и ядерные отходы.

Ключевые слова: твердый остаток, мазут, дизельное топливо, железнодорожная цистерна, уровень звукового давления, микрофон.

Acoustic monitoring of the volume of solid residues of petroleum products in railroad cars using dual-microphone measurement technique

Kolykhalin V.M.

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

Abstract

The article is devoted to experimental studies of the acoustic field in the air volume of a cylindrical tank shell with different volume of solid residue of fuel oil and diesel fuel in wintertime. The purpose of experimental studies of the acoustic field excited in the air volume of the tank by means of impact is to estimate the volume of solid residue of petroleum product in the end parts of railroad cars using a two-microphone measurement technique. The natural frequencies of vibration of the air in the tank are modeled by considering its walls as

absolutely rigid and the residue surface as impedance. Computer modeling of the acoustic field, correlation interaction of the first reflections (from the impedance surface of the solid residue and absolutely rigid walls of the tank) allows visual estimation of both the absorption properties of the residue and rational positioning of a pair of identical microphones in the tank. The results of physical modeling, as it is supposed, can be used in full-scale conditions for registration of oil product residues in mobile tanks at thermal power plants (TPP), terminals and other objects of energy industries. The investigated non-contact acoustic monitoring system can find application for registration of the volume, not excluding nuclear waste.

Keywords: solid residue, fuel oil, diesel fuel, railroad cars, sound pressure level, microphone.

Введение

В жестко регламентированных условиях транспортировки нефтепродуктов (н/п) от нефтеперерабатывающего завода (НПЗ) к потребителю временной фактор является ключевым, определяющим возможные финансовые потери в процессе перевалки высоковязких мазутов и дизельного топлива на нефтяных терминалах Российской Федерации, особенно в зимний период. Практическое отсутствие в нефтяной индустрии методов и средств дистанционного контроля массы остатка нефтепродуктов вызывает необходимость решения наиболее сложной задачи при выгрузке н/п из цистерн - оценке объема твердого остатка, как показано на рисунке 1. Обычный визуальный контроль в этом случае приводит к значительным затратам времени, не обеспечивает необходимой точности и, как результат, приводит к существенным потерям н/п при грузовых операциях. Сложность практической реализации диагностики остатка высоковязкого мазута обусловлена тем, что на точность измерений значительно влияют технологические особенности: повышение температуры н/п от 0°C до $+80^{\circ}\text{C}$; внешнее изменение температуры открытых воздушных объемов от -10°C до $+40^{\circ}\text{C}$, сопровождающееся испарением легких фракций нефтепродуктов и воды (пар); соответствующие изменения плотности нефтепродукта при повышенных и пониженных температурах. Отсутствие теплоизоляции приводит в зимнее время к застыванию мазута на стенках цистерны в виде достаточно твердого осадка сложной формы, что вызывает необходимость применения специального технологического процесса для его размыва.



Рис. 1. Твердый остаток н/п в ж/д цистернах в зимний период: а) дизельного топлива, б) высоковязкого мазута марки М100 (вид сверху через смотровой люк ц/с)

Дизельное топливо (д/т) выгружается из ж/д цистерн самотеком – низкая температура вспышки (в закрытом тигле примерно 65 °С) не допускает применения технологии циркуляционного размыва остатка, как в случае с высоковязким мазутом. Разогрев твердого остатка д/т в цистернах осуществляется обогревом оболочки ц/с острым паром в специализированных тепловых тоннелях. Форма поверхности остатка дизельного топлива (смесь парафинов с присадками) вдоль днища ж/д цистерны представлена на рисунке 1а. Вид сверху через смотровой люк на твердый остаток мазута, «подплывшего» к клапану нижнего сливного отверстия, расположенного в центре цистерны, показан на рисунке 1б.

1. Компьютерное моделирование акустического поля в ж/д цистернах с твердым остатком дизельного топлива

Эффективность применения акустического способа для контроля состояния слива н/п из железнодорожных цистерн и регистрации объема остатка была обоснована в предыдущих работах автора [1, 2]. Дистанционный метод оценки объема твердых остатков н/п в передвижных резервуарах основывается на физическом моделировании волнового поля «свободного» воздушного объема и сравнительных измерений в нем спектров уровней звукового давления вынужденных колебаний аксиальных и радиально-связанных мод в оптимальном низкочастотном интервале Δf . Горизонтальное положение цистерны и, соответственно, уровня остатка н/п практически исключает влияние на результат диагностики низкочастотных аксиальных мод. Однако, более высокочастотные радиальные моды с достаточной точностью (по добротности) реагируют как на величину свободного воздушного объема, так и, относительно, на объем твердого остатка [3-5]. Наличие импульсного источника акустических колебаний в воздушном объеме ц/с, создающего сплошной спектр собственных мод, позволяет применить достаточно точный для практики объективный контроль остатка. Объем остатка определяется по вынужденным колебаниям радиальных мод в частотной зоне перехода от дискретных аксиальных к более сплошным радиальным модам.

Известно, что в полусферических торцах ц/с остается наибольшая часть твердого остатка. С целью получения характеристик акустического поля в ж/д цистернах с остатком нефтепродуктов было выполнено компьютерное моделирование с применением метода конечных элементов в программе «Comsol». На рисунке 2 отчетливо проявляется суперпозиция радиальных и аксиальных мод.

Компьютерное моделирование взаимодействия первых отражений от импедансной поверхности остатка н/п, как показано на рисунке 1, и абсолютно жестких стенок ц/с позволяет визуально оценить как поглощающие свойства материала (на рисунках 2а, 2б показаны скошенные нижние торцы резервуара), так и наиболее эффективное позиционирование микрофонов при измерениях.

На практике удары по оболочке цистерны с дизельным топливом не допустимы по причине взрывоопасности паров легких фракций н/п, в отличие от высоковязких мазутов. Для такого случая источник звукового сигнала моделируется как Гауссов импульс длительностью 0,1 с, возбуждаемый громкоговорителем, расположенным внутри ц/с, в верхней центральной части резервуара, как показано на рисунке 3.

С целью исследования влияния акустических помех, фокусируемых полусферическими торцами оболочки (радиус полусфер ц/с $R_{1,2} = 1$ м), на точность мониторинга объемов остатка была построена горизонтальная плоскость сечения вдоль наибольшей оси конечно-элементной модели, как показано на рисунке 3а, для полуволнового резонанса аксиальной моды. Импульсный источник звука расположен по центру модели в верхней ее части и направлен перпендикулярно к днищу, микрофон

установлен в центре ц/с. Здесь в явном виде проявляется влияние помех, фокусируемых полусферическими торцами оболочки: существенное – в пустой левой части резервуара на расстоянии 1...1,5 м от торца и малозаметное – в правой части цистерны, заполненной остатком. На рисунке 3б представлен график снижения амплитуды звукового давления в зависимости от времени, демонстрирующий импульсную характеристику резервуара после включения одиночного звукового импульса, при расположении микрофона в центре ц/с. По оси абсцисс отложено время наблюдения (с), по оси ординат отложено среднеквадратичное значение звукового давления (Па).

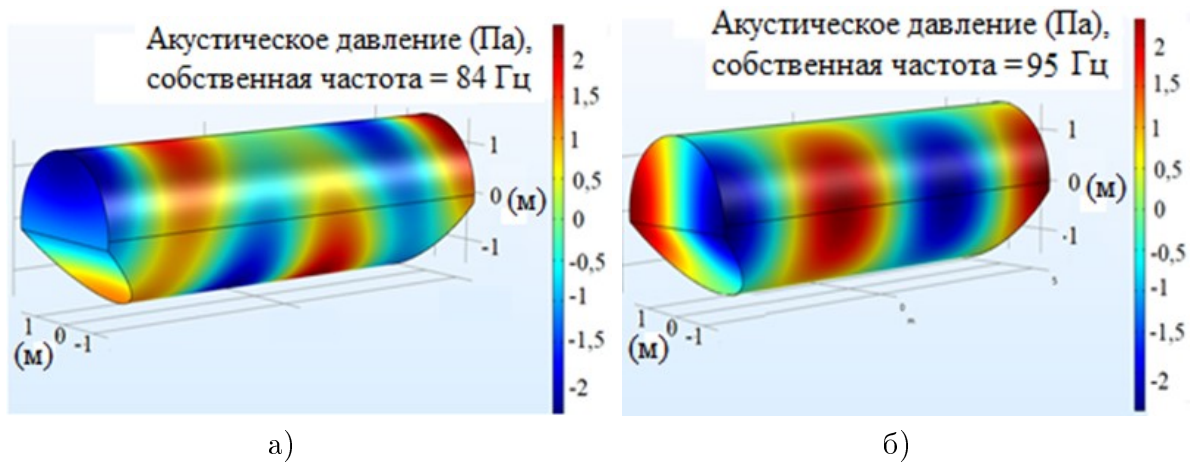


Рис. 2. Конечно-элементная модель ж/д цистерны: а) визуализация распределения аксиальных и радиальных (по вертикали) мод, б) визуализация распределения аксиальных и радиальных (по горизонтали) мод

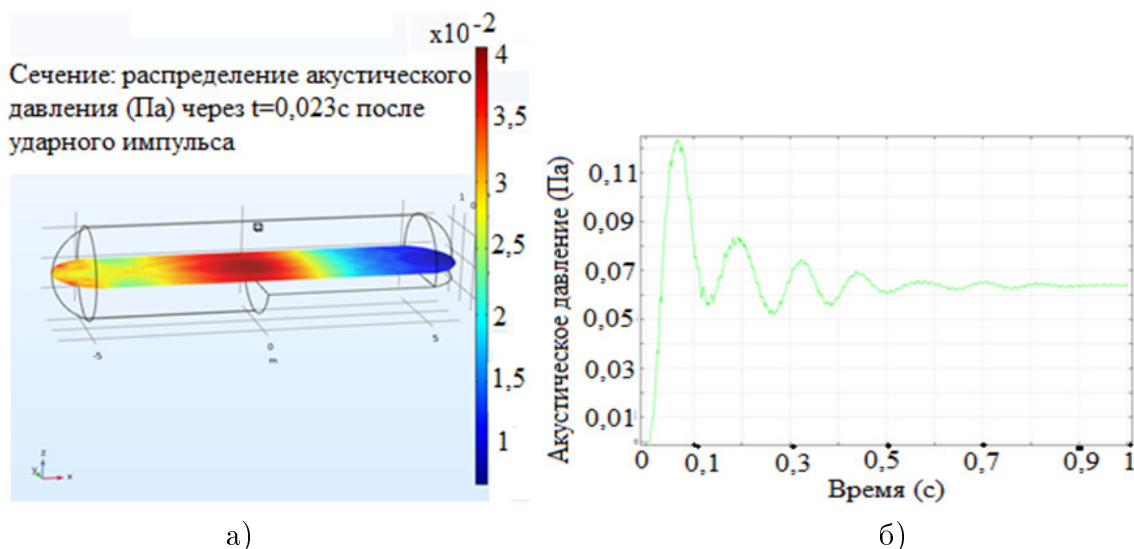


Рис. 3. Компьютерное моделирование: а) конечно-элементная модель оболочки с остатком в правой половине, б) график снижения амплитуды звукового давления в зависимости от времени

В результате вышерассмотренного моделирования характеристик акустического поля резервуара было определено оптимальное позиционирование микрофона для регистрации объемов твердых остатков (примерно 3 м от центра) и применено для дальнейшего исследования: оценка объема твердого остатка V_i с использованием метода нормирования уровней звукового давления при разных объемах остатка в торцевых частях ц/с к уровню звукового давления относительно «пустой» части цистерны. Два

идентичных микрофона располагались: $МК_2$ – в центре ц/с, $МК_1$ – на расстоянии 3 м от центра ц/с над остатком. Здесь импульсный источник звука расположен по центру цистерны в верхней ее части и направлен перпендикулярно к днищу, как показано на рисунке 4а. График затухания звуковых колебаний в зависимости от времени представлен на рисунке 4б. По оси абсцисс отложено время измерения, по оси ординат отложено среднеквадратичное значение звукового давления (Па).

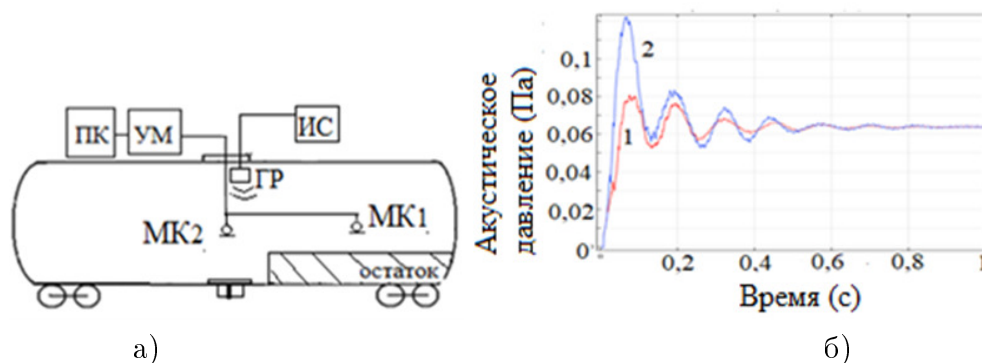


Рис. 4. Компьютерное моделирование: а) схема измерительной установки: $МК_1$ и $МК_2$ – микрофоны, ГР – громкоговоритель, ИС – ударный источник сигнала, УМ – двухканальный усилитель микрофонов, ПК – компьютер; б) импульсная характеристика резервуара с применением двухмикрофонной техники измерения: 1 – канал с $МК_1$, 2 – канал с $МК_2$

Уровень остатка в модели был задан $h = 0,5$ м по оси z (примерно 10% от объема ц/с). График с наибольшей амплитудой соответствует свободной от остатка части ц/с (график 2 - на рисунке 4б), график с меньшей амплитудой соответствует объему с остатком (график 1 - на рисунке 4б).

С целью оценки объема остатка и визуализации вклада импедансной поверхности остатка в акустическое поле резервуара уровень остатка было установлено два различных объема остатка в соответствии с высотой по оси z от днища: $h = 0,5$ м (примерно 7% от объема ц/с) и $h = 1$ м (примерно 15% от объема ц/с), как показано на рисунке 5.

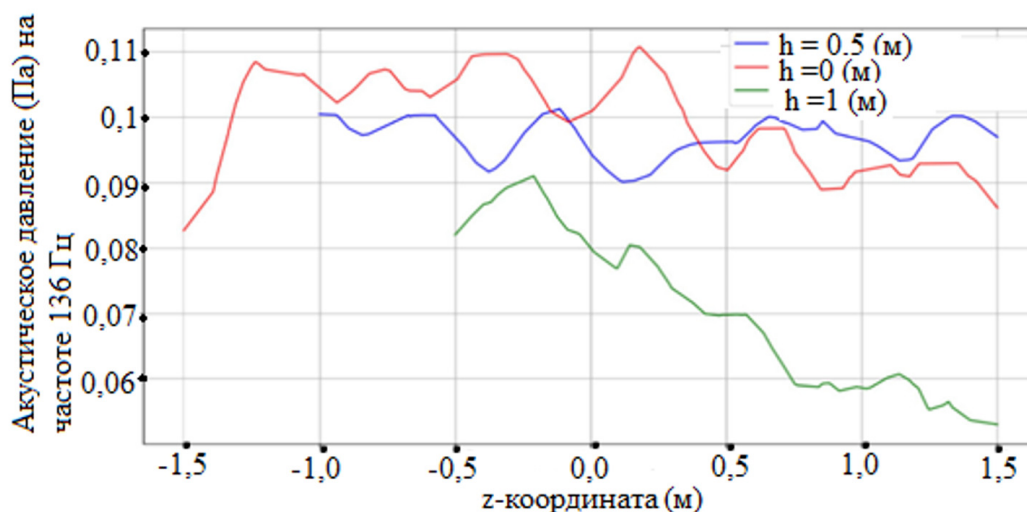


Рис. 5. Графики зависимости среднеквадратичного звукового давления от объема остатка, моделируемому по высоте h от днища цистерны по оси z (м) для трех различных объемов

На рисунке 5 представлен графики зависимости среднеквадратичного звукового давления (Па) от объема остатка, моделируемому по высоте на оси z (м): микрофон МК₂ установлен в центре ц/с (график красного цвета), микрофон МК₁ установлен в части резервуара, заполненного остатком – на 0,5 м по оси z (график синего цвета) и на 1 м по оси z (график зеленого цвета). График, соответствующий наибольшему объему остатку, в явном виде демонстрирует звукопоглощающие свойства продукта.

Таким образом, компьютерное моделирование позволяет достаточно эффективно прогнозировать объем твердого остатка н/п с применением метода нормирования, соответствующих амплитудный значений звукового давления относительно эталонного, соответствующего пустой половине ц/с.

2. Физическое моделирование акустического поля в ж/д цистернах с твердым остатком мазута

Рассмотренные выше результаты компьютерного моделирования и работы других авторов [6-9] были учтены при физическом моделировании акустического поля в ж/д цистернах с твердым остатком мазута. Модель ж/д цистерны была выполнена в масштабе М1:10 (длина - 1,1 м, диаметр 0,3 м), включающая: пару идентичных микрофонов – МК₁, установленный на телескопическом штативе вдоль наибольшей оси на расстоянии $L = 0,35$ м от центра и МК₂, установленный в центре ц/с; двухканальный микрофонный усилитель «Dual Microphone Supply Type 5935» (B&K); импульсный источник звука (удар по внешней оболочке ц/с). С целью минимизации влияния аксиальных, а также горизонтальных радиальный мод, отраженных от боковых стенок ц/с, на точность мониторинга вертикальных радиальных мод микрофоны были экранированы конусами, как показано на рисунке 6а, что обеспечило достоверность измерений (рисунок 6б).

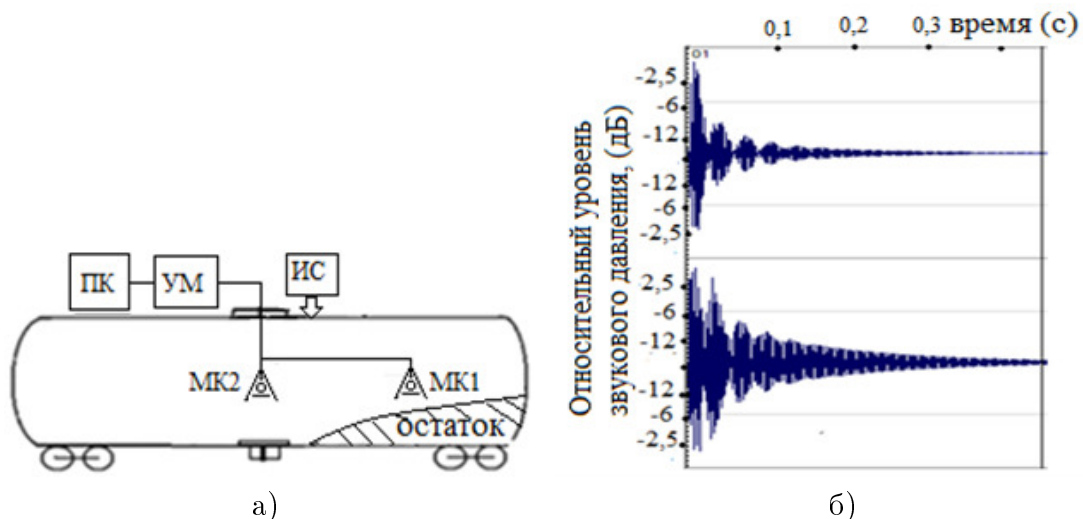


Рис. 6. Физическое моделирование: а) ИС – импульсный источник звука, МК₁ и МК₂ – микрофоны, УМ – двухканальный усилитель мощности микрофонов, ПК – компьютер; б) ауди-спектры импульсной характеристики резервуара

Для оценки твердого остатка мазута в физической модели, как и в компьютерном моделировании, применялся метод нормирования уровней звукового давления при разных объемах остатка н/п в торцевых частях ц/с относительно уровня звукового давления в «пустой» части цистерны посредством пары идентичных микрофонов с двухканальным микрофонным усилителем (с выходом на ПК), как показано на рисунке 6а).

На рисунке 6б представлены аудиограммы импульсной характеристики

резервуара, с применением ударного внешнего источника сигнала: правый канал (верхний на рисунке 6б) соответствует звуковому давлению, измеренному микрофоном МК₁, левый канал (нижний на рисунке 6б) соответствует звуковому давлению, измеренному микрофоном МК₂. Существенное отличие ауди-спектров левого и правого каналов демонстрирует эффективность применения метода нормирования амплитудных значений уровней звуковых давлений.

На рисунках 7 и 8 показаны спектры звукового давления для двух разных объемов остатка н/п (примерно 7% и 15% от объема резервуара соответственно) в торцевых частях ц/с, как и в примерах компьютерной модели, представленной на рисунке 5. Спектры, соответствующие звуковому давлению, измеренному с объемом остатка 7%, представленные на рисунке 7, и звуковому давлению, измеренному с объемом остатка 15%, представленные на рисунке 8, значительно отличаются друг от друга в диапазоне 1–2 кГц (на частоте второй радиальной моды).

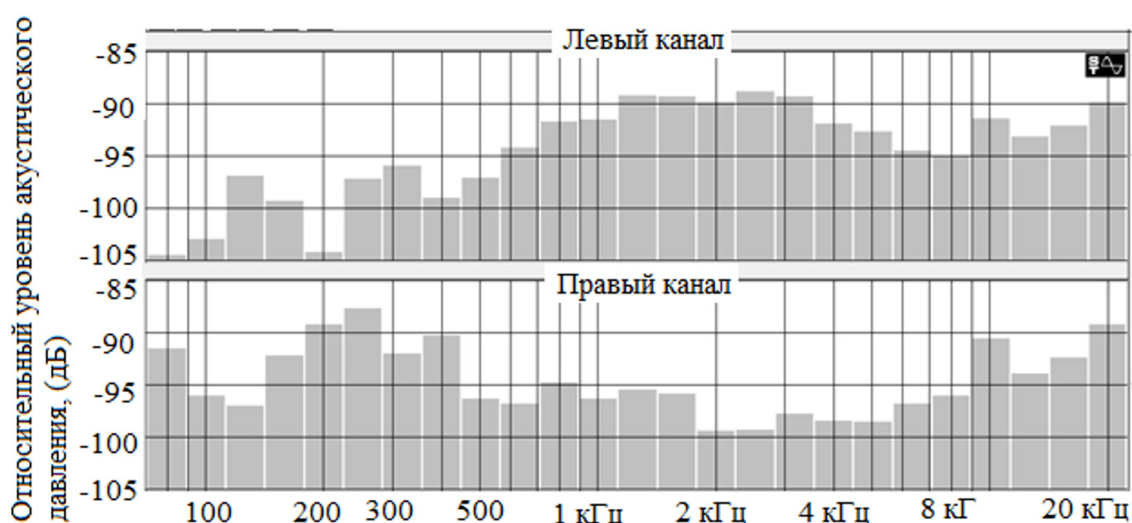


Рис. 7. Спектры, соответствующие объему остатка н/п 7% от общего объема модели

По оси абсцисс отложена частота (Гц), по оси ординат – относительный уровень звукового давления ΔN (дБ).

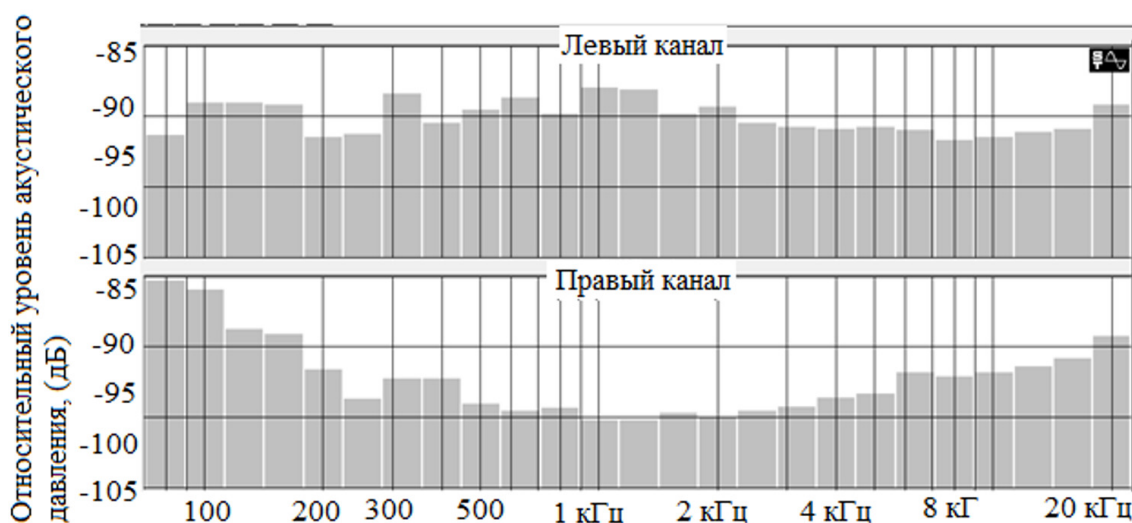


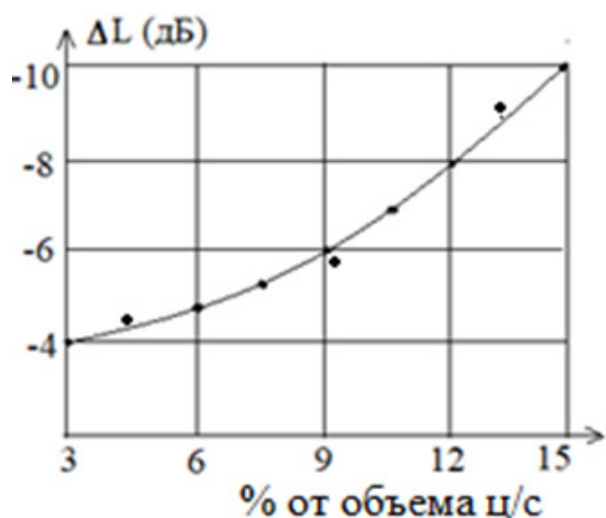
Рис. 8. Спектры, соответствующие объему остатка н/п 15% от общего объема модели

Как видно из рисунков 7 и 8, существенное снижение уровней звукового давления, особенно в диапазоне возбуждения первых радиальных мод (800...1500 Гц) происходит, в основном, из-за увеличения звукопоглощающей поверхности мазута при большем объеме остатка.

В вышеприведенных модельных измерениях, за счет применения экранирования конусами измерительных микрофонов МК₁ и МК₂, был реализован эффективный мониторинг зависимости изменения объема остатка мазута от амплитудных значений уровней второй радиальной моды (правый канал). Таким образом, наблюдается снижение экстремальных значений уровней звукового давления вторых радиальных мод при изменении объема остатка с 10% (правый канал на рисунке 7) до 15% (правый канал рисунке 8).

По результатам модельных измерений для 8 различных объемов остатков мазута на рисунке 9а представлен график зависимости относительного уровня звукового давления (дБ) от объема остатков в резервуаре (в % от объема модели). Для накопления в торцах модели твердого остатка мазут охлаждался и его объем измерялся так же, как и в натурных условия, показанных на рисунке 9б, с применением лазерного термометра.

Таким образом, в вышеприведенных исследованиях показана возможность аппаратурной реализации и эффективность акустического мониторинга объема твердого остатка вещества по методу нормирования амплитуд второй аксиальной моды спектров звукового давления, позволяющая дистанционно оценить его объем в резервуаре. На практике дистанционный мониторинг твердого остатка мазута в ж/д цистернах по данному методу может быть реализован с применением переносной измерительной установки с применением типовой регистрирующей аппаратуры и персональных компьютеров. Тогда для построения натурального графика зависимости относительного уровня звукового давления от объема остатков в резервуаре достаточно эффективен существующий подход визуальной оценки твердого остатка мазута с применением дистанционного лазерного термометра, как показано на рисунке 9б: на котле ц/с проведены линии границ твердого остатка (по разности температур воздушной фазы и твердого остатка), объем которого уменьшался после каждого цикла циркуляционного размыва.



а)



б)

Рис. 9. а) График зависимости относительного уровня звукового давления от объема остатков в резервуаре; б) существующий подход визуальной оценки твердого остатка н/п

Системный подход к выгрузке твердого остатка н/п включает не только вышерассмотренный способ оценки объема остатка, но и другие решения к сокращению временных потерь в целом.

Технология выгрузки твердого остатка, реализованная на ПНТ с применением устройства верхнего размыва УВР, разработанная в [1], предполагает оценку остатка (акустическим способом) и дальнейший циркуляционный размыв нагретым мазутом. При наиболее сложных погодных условиях в зимнее время такой процесс длится более 10 часов (при нормативном времени полной выгрузки н/п 8 часов). Тогда возникает проблема минимизации времени выполнения составляющих подпроцессов, в том числе и времени заполнения ц/с через УВР оптимальным объемом (массой) нагретого мазута, существенно влияющее на продолжительность выгрузки остатка.

Уравнение, используемое для описания теплоотдачи нагретого мазута твердому остатку, основано на законе сохранения энергии (первом законе термодинамики). Поглощение (или потеря) тепла нефтепродуктом увеличивает (или уменьшает) внутреннюю энергию U - сумму кинетической и потенциальной энергии. Изменение внутренней энергии твердого остатка ΔU при воздействии теплового потока нагретого мазута можно представить как:

$$\Delta U = m \int_{T_1}^{T_2} c(T) dT, \quad (1)$$

где $c(T)$ – удельная теплоемкость мазута; m – масса мазута, т; T_1, T_2 – температура твердого остатка и нагретого мазута соответственно.

Для случаев, когда удельная теплоемкость (T) приблизительно постоянна в рабочем диапазоне температур (0...100 °C), уравнение (1) сводится к следующему:

$$\Delta U = mc(T_2 - T_1) = mc\Delta T. \quad (2)$$

В соответствии с законом сохранения энергии $\Delta U_{\text{мазута}} = -\Delta U_{\text{остатка}}$ уравнение (2) можно записать:

$$m_{\text{мазута}} c_{\text{мазута}} \Delta T_{\text{мазута}} = -m_{\text{остатка}} c_{\text{остатка}} \Delta T_{\text{остатка}}, \quad (3)$$

где $\Delta T = T_{\text{конечная}} - T_{\text{начальная}}$.

Согласно закону Фурье, теплообмен будет продолжаться до тех пор, пока: $T_{\text{конечная мазута}} = T_{\text{конечная остатка}} = T_{\text{равновесия}}$. Тогда уравнение (3) можно представить в следующем виде:

$$m_{\text{маз}} c_{\text{маз}} (T_{\text{равнов}} - T_{\text{нач маз}}) = m_{\text{ост}} c_{\text{ост}} (T_{\text{нач ост}} - T_{\text{равнов}}). \quad (4)$$

Таким образом, оптимальный объем (масса) нагретого мазута для размыва твердого остатка находится из уравнения:

$$m_{\text{маз}} = \frac{m_{\text{ост}} c_{\text{ост}} (T_{\text{ост}} - T_{\text{равнов}})}{c_{\text{маз}} (T_{\text{равнов}} - T_{\text{маз}})}. \quad (5)$$

В допущении, что котел ж/д цистерны полностью изолирован, температура теплового равновесия для объемов остатка и мазута может быть задана, например, как $T_{\text{рав}} = 50^\circ\text{C}$. Тогда масса (объем) мазута $m_{\text{маз}}$, нагретого, например до $T_{\text{маз}} = 70^\circ\text{C}$, при фиксированной температуре твердого остатка в зимнее время $T_{\text{ост}} = 0^\circ\text{C}$, может быть получена из (5). Для расчета удельная теплоемкость мазута использовалась формула

Н.М. Михайлова $c_{\text{маз}} = 2018 + 3,2(t - 100)$. Результаты расчетов и данные для построения графиков зависимости массы мазута от массы остатка, обеспечивающих оптимальный теплообмен, как показано на рисунке 10, представлены в таблице 1 для различных $T_{\text{маз}}$.

На рисунке 10 по оси абсцисс отложены значения массы твердого остатка мазута, измеренные, например, вышерассмотренным акустическим способом, по оси ординат отложены значения оптимальной массы нагретого мазута, достаточной для эффективного размыва остатка. Эффект оптимизации заключается в сокращении времени наполнения ц/с расчетным объемом мазута, а не по часто применяемому на практике методу «до полной цистерны».

Таблица 1

Исходные данные для построения графиков зависимости массы мазута от массы остатка

№	$m_{\text{мазута}}, \text{Т}$	$c_{\text{мазута}}, \text{кДж/кг}\cdot^\circ\text{C}$	$T_{\text{маз}}, ^\circ\text{C}$	$m_{\text{остатка}}, \text{Т}$	$c_{\text{остатка}}, \text{кДж/кг}\cdot^\circ\text{C}$	$T_{\text{ост}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{равнов}}, ^\circ\text{C}$
1	21	2	70	10	1,7	0	50
2	17	2	70	8	1,7	0	50
3	8,5	2	70	4	1,7	0	50
4	8,5	2	100	10	1,7	0	50
5	6,8	2	100	8	1,7	0	50
6	3,4	2	100	4	1,7	0	50

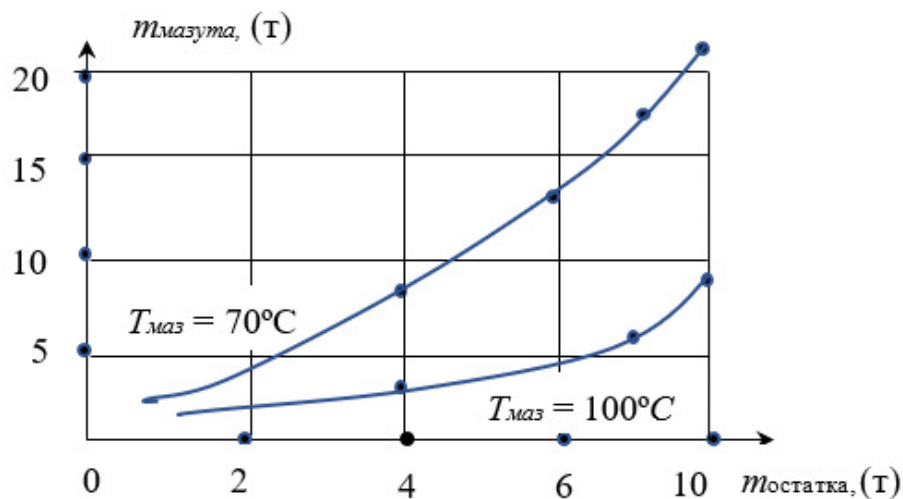


Рис. 10. Графики зависимости массы нагретого мазута от массы остатка, обеспечивающей оптимальный теплообмен

3. Прогноз экономических рисков на основе применения акустического мониторинга объема твердых остатков нефтепродуктов в ж/д цистернах

В предыдущей работе [4] было рассмотрено применение на нефтяных терминалах надежно-ориентированного технического обслуживания (RCM-2), обеспечивающее управление отказами компонентов в части внедрения акустического мониторинга объема твердых остатков н/п в стационарных резервуарах. Для оптимизации производственных

затрат (уменьшения продолжительности работы котельных установок, теплообменников, насосных агрегатов и др.), снижения риска невыполнения контрактных обязательств по своевременной доставке груза к потребителю достаточно эффективно применима методология риск-ориентированного технического обслуживания (RCM-3), широко внедренная во всех зарубежных отраслях энергетики, в том числе и на нефтяных терминалах. Выполнения проактивных RCM-мероприятий по управлению техническим состоянием оборудования, позволяющих снизить критичность риска до приемлемого уровня, содержится в концепции методологии [10-13]. Ниже представлен метод снижения риска потери функции системы выгрузки н/п из ж/д цистерн, основанного на применении акустического мониторинга уровней звукового давления внутри ж/д цистерны, частично заполненной твердым остатком высоковязкого мазута.

Процесс транспортировки н/п от нефтеперерабатывающем заводе (НПЗ) до потребителя состоит из нескольких подпроцессов:

- погрузка н/п в ж/д цистерны на НПЗ;
- ж/д перевозка н/п и транспортная логистика по доставке цистерн к месту выгрузки;
- выгрузка н/п из ж/д цистерн в резервуары хранения (РВС) на специализированных эстакадах нефтяных терминалов;
- хранение н/п в РВС и погрузка н/п на морские/речные танкеры.

Каждый подпроцесс содержит перечень систем, обеспечивающих выполнение его целевых ориентиров. Важной промежуточной задачей, решаемой при выполнении RCM-анализа системы выгрузки н/п из ж/д цистерн, является разделение всей совокупности компонентов данной системы на критические и некритические. Для этого определяются:

- функции системы;
- функциональные отказы системы;
- виды отказов компонентов системы;
- вероятные последствия отказов компонентов;
- вероятные причины отказов компонентов;
- критичность видов отказов компонентов;
- RCM-мероприятия по управлению видами отказов.

К *функциям системы* выгрузки н/п из ж/д цистерн относятся: выгрузка н/п в фиксированном временном интервале; сохранения качества и количества н/п.

К *функциональным отказам* системы выгрузки относятся: остановка транспортировки н/п, потеря количества высоковязкого мазута при выгрузке из ж/д цистерн, потеря качества н/п при смешении с другими видами н/п в бункеровочной системе нефтяного терминала.

Ниже рассматривается доминирующий функциональный отказ системы выгрузки н/п - потеря количества высоковязкого мазута при выгрузке из ж/д цистерн.

Система выгрузки состоит из следующих компонентов: котельная, теплообменники, насосные агрегаты, трубопроводная система, высоковязкий мазут, контрольно-измерительное оборудование и электроснабжение.

К *видам отказа* компонента высоковязкий мазут относятся: потеря количества н/п в виде твердого остатка, розлив мазута на эстакаде выгрузки.

Вероятными *последствиями* такого вида отказа могут быть: неукomплектованная грузом танкерная партия и, как следствие, потребность закупки н/п такого же качества для компенсации невыгруженного твердого остатка в ж/д цистернах.

К *первопричинам* вида отказа - потеря количества высоковязкого мазута при выгрузке из ж/д цистерны - относятся: высокая температура застывания мазута,

визуальный контроль объема твердого остатка в цистерне, задержка цистерн по железнодорожному маршруту из НПЗ на терминал в зимнее время. Реализация перечисленных факторов приводит к формированию твердого остатка мазута в цистернах. К коренной причине такого вида отказа относятся: отсутствие технологии дистанционного контроля твердого остатка в цистерне.

Классификация по критичности отказа компонента выполняется по времени продолжительности выгрузки н/п, тяжести последствий вида отказа и формализуется в диаграмме критичности отказа компонента, представленной на рисунке 11. На одной оси диаграммы критичности отказа откладывается степень критичности простоя ц/с при размыве твердого остатка, на другой оси диаграммы откладывается уровень влияния на строго регламентированное время погрузки н/п на танкер. Здесь экспертно выполняется классификация риска отказа: прямоугольнику красного цвета соответствует высокий риск, прямоугольнику синего цвета соответствует значительный риск, прямоугольнику желтого цвета соответствует умеренный риск, прямоугольнику зеленого цвета соответствует низкий риск. Так для маловязких мазутов (например, мазут технологический с температурой застывания $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$) твердый остаток образуется крайне редко – вид отказа не критичный, тогда как для высоковязких мазутов (температура застывания $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$) твердый остаток формируется постоянно и в больших объемах в зимнее время – вид отказа критичный.



Рис. 11. Диаграмма классификации риска задержки груза на танкер по причине длительной выгрузки твердого остатка из ц/с

Ранжирование по критичности необходимо, прежде всего, для оптимизации задач акустического мониторинга: прогнозирования времени выгрузки продукта из ц/с и возможных потерь количества н/п, для каких видов н/п требуется акустический мониторинг твердых остатков.

На основе выше рассмотренного применения основных положений методологии RCM-3 для построения матрицы риска разрабатывается классификатор риска, содержащий структурированную статистику простоя в зимний сезон: времени выгрузки, количества ц/с с остатками, марки н/п, нефтеперерабатывающие заводы и др. Такой классификатор риска на основе данных акустического мониторинга позволит прогнозировать снижение критичности логистические операции, минимизируя финансовые потери.

Так, например, для формирования танкерной партии, например, 30 тыс. т высоковязкого мазута марки М-100, поставляемого из трех нефтеперерабатывающих заводов (НПЗ) в зимнее время, необходимо выгрузить 520 ц/с в резервуары хранения,

предельно минимизируя объем твердых остатков. Для расчета вероятности состояния D_1 (н/п выгружен из ц/с без остатка в течение нормированного времени), при наличии комплекса признаков K с различными реализациями признаков k_j , целесообразно применить формулу Байеса [14].

Если имеется состояние D_i и признак k_j , встречающийся при этом состоянии, то вероятность совместного появления событий (наличие состояния D_i и признака k_j) можно определить следующим образом:

$$P(D_i \wedge k_j) = P(D_i) P(k_j/D_i) = P(k_j) P(D_i/k_j). \quad (6)$$

Из этого равенства вытекает формула Байеса – вероятность состояния D_i при наличии признака k_j :

$$P(D_i/k_j) = P(D_i) \frac{P(k_j/D_i)}{P(k_j)}, \quad (7)$$

где $P(D_i/k_j)$ – вероятность состояния D_i при наличии признака k_j (апостериорная вероятность состояния); $P(D_i)$ – вероятность состояния D_i , определяемая по статистическим данным (априорная вероятность). Так, если предварительно обследовано N ц/с и у N_i ц/с имелось состояние D_i , то вероятность $P(D_i)$ постановки состояния D_i определяется $P(D_i) = N_i/N$; $P(k_j/D_i)$ – вероятность появления признака k_j у ц/с с состоянием D_i ; $P(k_j)$ – вероятность появления признака k_j во всех ц/с независимо от состояния (диагноза).

Если из общего числа N цистерн признак k_j был обнаружен у N_j объектов, тогда $P(k_j) = N_j/N$.

Обобщённая формула Байеса относится к случаю, когда обследование проводится по комплексу признаков K , включающему признаки $k_1, k_2, \dots, k_v$. Каждый из признаков k_j имеет s_j разрядов ($k_{j1}, k_{j2}, \dots, k_{js}$). В результате обследования становится известной реализация признака $k_j = k_{js}$ и всего комплекса признаков K . Вероятность появления комплекса признаков K имеет вид:

$$P(K) = \sum_{s=1}^n P(D_s) P(K/D_s). \quad (8)$$

Обобщённую формулу Байеса с учетом (6) и (7) можно представить в следующем виде:

$$P(D_i/K) = \frac{P(D_i) P(K/D_i)}{\sum_{s=1}^n P(D_s) P(K/D_s)}. \quad (9)$$

С целью прогнозирования времени выгрузки н/п из ц/с и возможных потерь количества н/п с применением данных акустического мониторинга рассматривается комплекс признаков K , включающий признаки: k_1 – время транспортировки ж/д цистерн от НПЗ до ПНТ, k_2 – температура застывания мазута марки М-100, k_3 – средняя температура воздуха окружающей среды в течение транспортировки от НПЗ до ПНТ.

В таблице 1 приведены значения, полученные из опыта эксплуатации на ПНТ лично автором, для случая выборки данных о выгрузке 72 ц/с из общей танкерной партии 520 ц/с мазута М-100: общее число выгруженных цистерн $N = 72$, число ц/с без остатка $N_1 = 54$, число ц/с с твердым остатком $N_2 = 18$.

Ниже рассматриваются два состояния: D_1 – отсутствие остатка н/п, D_2 – наличие остатка н/п, включающие признаки k_1, k_2 , и k_3 с соответствующими разрядами.

Признак k_1 имеет следующие разряды:

k_{11} – количество ж/д цистерн, время транспортировки которых менее 7 суток: для состояния D_1 – 60 % от общего числа выгруженных ц/с в выборке ($N = 72$), для состояния D_2 – 10 % от общего числа выгруженных ц/с в выборке ($N = 72$);

k_{12} – количество ж/д цистерн, время остатка по транспортировке которых от 8 до 15 суток: для состояния D_1 – 20 % , для состояния D_2 – 10 % ;

k_{13} – количество ж/д цистерн, время транспортировки которых более 16 суток: для состояния D_1 – 20 % , для состояния D_2 – 80 % .

Признак k_2 имеет разряды:

k_{21} – количество ж/д цистерн, в которых температура застывания мазута менее 22°C (Омский НПЗ): для состояния D_1 – 70 % , для состояния D_2 – 8 % ;

k_{22} – количество ж/д цистерн, в которых температура застывания мазута $T = 22^\circ\text{C} - 27^\circ\text{C}$ (Сызранский НПЗ): для состояния D_1 – 15 % , для состояния D_2 – 7 % ;

k_{23} – количество ж/д цистерн, в которых температура застывания мазута выше 27°C (Орский НПЗ): для состояния D_1 – 15 % , для состояния D_2 – 85% .

Признак k_3 имеет следующие разряды:

k_{31} – средняя температура воздуха окружающей среды в течение транспортировки от НПЗ до ПНТ выше $T = -10^\circ\text{C}$: для состояния D_1 – 90 % , для состояния D_2 – 20 % ;

k_{32} – средняя температура воздуха окружающей среды в течение транспортировки от НПЗ до ПНТ ниже $T = -10^\circ\text{C}$: для состояния D_1 – 10 % , для состояния D_2 – 80 % .

В диагностической матрице, представленной в виде таблицы 2, приведены исходные данные для расчета вероятности образования твердого остатка по окончании нормированного времени выгрузки мазута из ц/с на эстакаде ПНТ.

Таблица 2

Диагностическая матрица данных для расчета вероятности образования твердого остатка

Состояние D_i	Время/продолжительность транспортировки, сутки			Температура застывания, °C			Температура воздуха, °C		$P(D_i)$
	k_{11}	k_{12}	k_{13}	k_{21}	k_{22}	k_{23}	k_{31}	k_{32}	
	7	8...15	16	22°C	23...27°C	27 °C	выше -10° C	ниже -10° C	
	$P(k_{11}/D_i)$	$P(k_{12}/D_i)$	$P(k_{13}/D_i)$	$P(k_{21}/D_i)$	$P(k_{22}/D_i)$	$P(k_{23}/D_i)$	$P(k_{31}/D_i)$	$P(k_{32}/D_i)$	
D_1	0,6	0,2	0,2	0,7	0,15	0,15	0,9	0,1	0,75
D_2	0,1	0,1	0,8	0,08	0,07	0,85	0,2	0,8	0,25

Диагностическая матрица данных для расчета вероятности образования твердого остатка

Пример 1: ниже приводится расчет по формуле (9) вероятности состояния D_1 (отсутствие остатка н/п) при выявлении комплекса признаков K с реализациями k_{11} , k_{22} и k_{32} :

$$\begin{aligned}
 P\left(\frac{D_1}{K}\right) &= \frac{P(D_1) P\left(\frac{K}{D_1}\right)}{P(D_1) P\left(\frac{K}{D_1}\right) + P(D_2) P\left(\frac{K}{D_2}\right)} = \\
 &= \frac{P(D_1) P(k_{11}/D_1) P(k_{22}/D_1) P(k_{32}/D_1)}{P(D_1) P(k_{11}/D_1) P(k_{22}/D_1) P(k_{32}/D_1) + P(D_2) P(k_{11}/D_2) P(k_{22}/D_2) P(k_{32}/D_2)} = \\
 &= \frac{0,75 \cdot 0,6 \cdot 0,15 \cdot 0,1}{0,75 \cdot 0,6 \cdot 0,15 \cdot 0,1 + 0,25 \cdot 0,1 \cdot 0,07 \cdot 0,8} \approx 0,8
 \end{aligned}$$

Таким образом, вероятность отсутствия остатка н/п при транспортировке менее 7 суток в зимнее время, диапазоне температуры застывания мазута $T = 22^{\circ}\text{C} - 27^{\circ}\text{C}$ и средней температуре воздуха окружающей среды в течение транспортировки от НПЗ до ПНТ ниже $T = -10^{\circ}\text{C}$ составляет: $P(D_1/K) = 0,83$ (83 %).

Учитывая, что состояния наличие или отсутствие остатка н/п образуют полную группу событий, вероятность состояния D_2 (наличия остатка н/п) рассчитывается следующим образом: $P(D_2/K) = 1 - P(D_1/K) = 1 - 0,83 = 0,17$ (17 %).

Пример 2: расчет вероятности состояния D_1 (отсутствие остатка н/п) при выявлении комплекса признаков K с реализациями k_{13} , k_{23} и k_{32} : транспортировка н/п более

16 суток, диапазон температуры застывания мазута более 28°C и средняя температура воздуха окружающей среды в течение транспортировки от НПЗ до ПНТ ниже -10°C составляет: $P(D_1/K) = 0,37$ (37 %). Тогда вероятность состояния D_2 (наличия остатка н/п) рассчитывается следующим образом: $P(D_2/K) = 1 - P(D_1/K) = 1 - 0,37 = 0,63$ (63 %).

При реализации вышерассмотренного акустического мониторинга на объектах энергетики может быть добавлен признак k_4 (относительный уровень звукового давления (дБ) в ц/с по данным акустического мониторинга), содержащий следующие разряды:

k_{31} - количество ж/д цистерн, у которых при оценке остатка двухмикрофонной техникой измерений относительного уровня звукового давления менее 5 дБ;

k_{32} - количество ж/д цистерн, у которых при оценке остатка относительный уровень звукового давления находится в диапазоне 5...10 дБ.

k_{33} - количество ж/д цистерн, у которых при оценке остатка относительный уровень звукового давления более 10 дБ.

Заключение

В настоящее время в северных районах Российской Федерации основным топливом для теплоэлектроцентралей (ТЭЦ), как правило, является мазут. Так на мурманских ТЭЦ более 80% тепла производится на привозном мазуте, ежегодное потребление которого доходит до 1 млн тонн. Поэтому проблема контроля остатков высоковязких нефтепродуктов в передвижных резервуарах имеет государственное значение. Например, при выгрузке 20 ж/д цистерн в зимний период твердый остаток в недоступных для визуального контроля торцах может достигать 20 тонн. Применение современной методологии риск-ориентированного технического обслуживания RCM-3, с возможным внедрением способа акустического мониторинга технологических характеристик оборудования, рассмотренное на примере системы выгрузки н/п из ц/с на нефтяных терминалах, позволит оценить риск отказа критических компонентов, своевременно прогнозировать возможные финансовые затраты при транспортировке н/п, когда оставшийся объем твердого остатка в ж/д цистернах идентифицируются как потеря груза. Аппаратурная реализация системы акустического мониторинга объема остатков различных веществ и их композиций на основе волновой модели звукового поля в накопительных резервуарах с ударным источником звуковых колебаний может быть применима также и в других отраслях промышленности: авиационной, судостроительной, атомной и других.

Список литературы

1. RU патент N 2348015 C1, от 27.02.2009 г. Способ определения объема остатка

твердого нефтепродукта в железнодорожном вагоне-цистерне / В.М. Колыхалин, В.В. Давыдов, В.В. Залипаев; патентообладатель В.М. Колыхалин // М., Федерал. служба по интеллект. собст., патент. и товар. знакам. - Бюл. № 6. - С. 10.

2. Геча В.Я., Либерман М.Ю., Шматков А.В. Исследование метрологической эффективности акустической интенсивиметрии при определении характеристик комплексных акустических полей, формирующихся в производственных помещениях при испытаниях электродвигателей // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. - 2018. - Т. 162, N 1. - С. 23-49.

3. Свет В.Д., Цысарь С.А. Особенности акустического профилирования донных отложений в больших нефтяных резервуарах // Акустический журнал. - 2018. - Т. 64, N 1. - С. 112-118.

4. Колыхалин В.М. Моделирование дистанционного мониторинга твердых остатков нефтепродуктов в резервуарах // NOISE Theory and Practice. - 2023. - Т. 9, N 4. - С. 7-24.

5. Зайцева Б. Д., Бородин И. А., Теплых А. А., Семёнова А. П. Определение скорости и затухания акустической волны в жидкостях с различным акустическим импедансом с помощью акустического интерферометра // Акустический журнал. - 2023. - Т. 69, N 4. - С. 438-445.

6. Вировлянский А.Л., Казарова А.Ю. Распределение интенсивности звукового поля в глубоком море в фазовом пространстве глубина-угол-время // Акустический журнал. - 2023. - Т. 69, N 5. - С. 515-527.

7. Сидоров Д.Д., Петников В.Г., Луньков А.А. Широкополосное звуковое поле в мелководном волноводе с неоднородным дном // Акустический журнал. - 2023. - Т. 69, N 5. - С. 608-612.

8. Голубев А.Ю., Потокин Г.А. Особенности применения интенсивиметрии для определения мощности акустического излучения панели в поле аэродинамических пульсаций давления // Измерительная техника. - 2018. - N 12. - С. 51-55.

9. Мурзинов В.Л., Мурзинов П.В., Мурзинов Ю.В., Кочерженко Д.В. Акустический метод диагностирования механических систем // Noise Theory and Practice. - 2024. - Т. 10, N 1. - С. 29-37.

10. IEC 60300-3-11:2009 Надежность в технике. Техническое обслуживание, ориентированное на надежность. - 2009. - URL: https://www.normservis.cz/download/view/iec/info_iec60300-3-11%7Bed2.0%7Db.pdf (дата обращения 20.03.2025).

11. EUR-23232 EN Модель управления сроком службы предприятия, включающая оптимизированную программу MS&I - вопросы безопасности и экономики. - 2007.

12. IAEA-TECDOC-1590 Применение технического обслуживания, ориентированного на надежность, для оптимизации эксплуатации и технического обслуживания атомных электростанций // МАГАТЭ, Вена. - 2007. - URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1590_web.pdf (дата обращения 20.03.2025).

13. INPO. AP-913 Описание процесса обеспечения надежности оборудования. Описание процесса.

14. Губарев П.В., Шапшал А.С., Черкесов Е.Ю. Применение метода Байеса для диагностики технического состояния узлов локомотивов // Известия ТулГУ. Технические науки. - 2020. - N 9. - С. 384-387.

References

1. RU patent N 2348015 C1, from 27.02.2009. Method for determining the volume of solid oil product residue in tank railroad cars / V.M. Kolykhalin, V.V. Davydov, V.V.

Zalipaev; patentee V.M. Kolykhalin // M., Federal Service for Intellectual Property, Paten. and Trademarks. - Bulletin. - N 6. - P. 10.

2. Gecha V.Ya.; Liberman M.Yu.; Shmatkov A.V. Investigation of the metrological efficiency of the acoustic intensimetry at determination of the characteristics of the complex acoustic fields formed in the production premises at the electric motors testing (in Russian) // Voprosy elektromekhaniki. Proceedings of VNIIE. - 2018. - Vol. 162, N 1. - P. 23-49.

3. Svet V.D., Tsysar S.A. Features of acoustic profiling of bottom sediments in large oil reservoirs // Acoustic Journal. - 2018. - Vol. 64, N 1. - P. 112-118.

4. Kolykhalin V.M. Modeling of remote monitoring of solid residues of oil products in tanks // NOISE Theory and Practice. - 2023. - Vol. 9, N 4. - P. 7-24.

5. 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 // Acoustic Journal. - 2023. - Vol. 69, N 4. - P. 438-445.

6. Virovlyansky A.L., Kazarova A.Yu. Sound field intensity distribution in the deep sea in the depth-angle-time phase space // Acoustic Journal. - 2023. - Vol. 69, N 5. - P. 515-527.

7. Sidorov D.D.; Petnikov V.G.; Lunkov A.A. Broadband sound field in a shallow-water waveguide with an inhomogeneous bottom (in Russian) // Acoustic Journal. - 2023. - Vol. 69, N 5. - P. 608-612.

8. Golubev A.Yu.; Potokin G.A. Peculiarities of intensimetry application for determination of the panel acoustic radiation power in the field of aerodynamic pressure pulsations // Measuring technique. - 2018. - N 12. - P. 51-55.

9. Murzinov V.L.; Murzinov P.V.; Murzinov Yu.V.; Kocherzhenko, D.V. Acoustic method of diagnostics of the mechanical systems // Noise Theory and Practice. - 2024. - Vol. 10, N 1. - P. 29-37.

10. IEC 60300-3-11:2009 Reliability in technology. Reliability-oriented maintenance. - 2009. - URL: https://www.normservis.cz/download/view/iec/info_iec60300-3-11%7Bed2.0%7Db.pdf (date of reference 20.03.2025).

11. EUR-23232 EN Enterprise life management model incorporating an optimized M&I program - safety and economic issues. - 2007.

12. IAEA-TECDOC-1590 Application of reliability-oriented maintenance to optimize the operation and maintenance of nuclear power plants // IAEA, Vienna. - 2007. - URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1590_web.pdf (date of reference 20.03.2025).

13. INPO. AP-913 Description of the equipment reliability process. Process Description.

14. Gubarev P.V.; Shapshal A.S.; Cherkesov E.Yu. Application of the Bayes method for diagnostics of the technical condition of the locomotive units // Izvestia TulSU. Technical sciences. - 2020. - N 9. - P. 384-387.