

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВИБРАЦИОННОГО ПОЛЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК С РАЗЛИЧНЫМИ ВИДАМИ ВЕЩЕСТВ В ПРИДОННОМ СЛОЕ*

А. А. Клещев¹, В. М. Колыхалин², В. С. Майоров³,
С. А. Пересёлков⁴, С. А. Ткаченко⁴

¹ – Санкт-Петербургский государственный морской технический университет;

² – Петербургский нефтяной терминал;

³ – ФГУП “Крыловский государственный научный центр”;

⁴ – Воронежский государственный университет

Поступила в редакцию 30.04.2020 г.

Аннотация. Статья посвящена экспериментальным исследованиям вибрационного поля цилиндрической оболочки с различными видами материалов, расположенных в виде донного слоя. Целью экспериментальных исследований вибрационного поля, возбуждаемого в оболочке с помощью удара, является поиск классификационных признаков различных видов веществ, по своим свойствам являющихся близкими к остаткам нефтепродуктов. Основное внимание в работе уделено спектральным и временным характеристикам сигналов, получаемых с датчиков виброускорения. В работе основным параметром, влияющим на спектральные и временные характеристики вибрационного поля, рассматривается входное механическое сопротивление оболочки в точке ударного возбуждения. Полученные резонансные характеристики вибрационного поля соответствуют изгибным колебаниям, возбуждаемым в оболочке при ударном возбуждении. Результаты работы предполагается использовать в натуральных условиях для классификации нефтяных остатков нефтяных резервуаров.

Ключевые слова: нефтепродуктовый резервуар, датчик виброускорения, вибрационное поле, резонатор Гельмгольца, корреляция.

EXPERIMENTAL RESEARCHES OF VIBRATING FIELD OF CYLINDRICAL CANS WITH DIFFERENT SUBSTANCES AT THE BOTTOM

A. A. Kleshchev, V. M. Kolykhalin, V. S. Mayorov,
S. A. Pereselkov, S. A. Tkachenko

Abstract. Experimental researches of vibrating field of a cylindrical can with different materials located at the bottom in the form of a ground layer are described. The purpose of experimental researches of the vibrating field in a can excited by impact is to search some classification attributes different substances being as close as to the rest of mineral oil. The spectral and time characteristic data of signals received from acceleration probes are given. The main parameter influencing on spectral and time characteristics of vibrating field is the entrance mechanical can resistance in a point of shock excitation. Resonant characteristics of a vibrating field corresponding to bending vibrations from shock excitation into can are received. Results of researches to be used in oil terminals for classification of oil tank rests are supposed.

Keywords: oil tank, acceleration probe, vibrating field, resonator Helmholtz, correlation.

* Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (проект 19-29-06075 и проект 19-08-00941).

© Клещев А. А., Колыхалин В. М., Майоров В. С., Пересёлков С. А., Ткаченко С. А., 2020

ВВЕДЕНИЕ

Сырая нефть содержит большое количество разных примесей, которые в процессе эксплуатации нефтяного резервуара оседают на дне. Определение объема донных отложений или нефтешламов является одной из ключевых задач эксплуатации нефтяных резервуаров. Большой объем отложений затрудняет эффективное использование резервуара, ускоряет его коррозию и может вызвать повреждение резервуара, сопровождающееся разливом нефти. В связи с этим отложения из резервуара должны периодически удаляться. Процедуры удаления или очистки достаточно трудоемки и дороги, и для оценки их эффективности необходимо знать как пространственное распределение отложений, так и их объем, причем наиболее важна оценка нефтешламов в твердой фазе, которые невозможно размыть или откачать. Обычный визуальный контроль в этом случае приводит к значительным затратам времени и не обеспечивает необходимой точности [1].

Применение метода акустического профилирования донных отложений в нефтяных резервуарах для оценки объема нефтяных остатков связано со значительными погрешностями [2]. Применение временных параметров реверберационных методов также затрудняет классифицировать вид донного остатка [3].

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

При рассмотрении задачи классификации донных осадков с использованием вибрационных характеристик нефтяных резервуаров важным параметром конструкции является входное механическое сопротивление, так как определяет величину колебательной мощности, поступающей в конструкцию от источника возбуждения.

Колебательная мощность, поступающая в возбуждаемую конструкцию от источника, тем меньше, чем больше ее механическое сопротивление.

Механическим сопротивлением конструкции называется отношение возбуждающего конструкцию динамического усилия к вызванной им колебательной скорости. Различают входное механическое сопротивление и переходное. В случае возбуждения конструкции силой F_1 ее входное сопротивление Z_{F11} равно отношению этой силы к колебательной скорости в месте возбуждения $\dot{\xi}_1$

$$Z_{F11} = F_1 / \dot{\xi}_1. \quad (1)$$

Классификацию остатков нефтепродуктов в оболочках в виде резервуаров и вагонов можно определить эффективностью вибропоглощения колебаний изгибных волн при выполнении испытаний с помощью удара, который является основным источником возбуждаемой энергии.

Известно, что виброизолирующий эффект определяется ослаблениями в децибелах энергии колебаний конструкции путем нанесения виброизолирующей массы (ВЗМ) в районе распространения вибраций [4]

$$ВИ = 10 \lg \frac{\langle w_{21} \rangle}{\langle w_{22} \rangle}, \quad (2)$$

где w_{21} , w_{22} — плотности колебательной распространяющейся энергии пластины за ВЗМ до и после ее установки.

Под ВЗМ будем понимать наличие остатка нефтепродуктов, а ослабление энергий вибрационных колебаний конструкции при возбуждении в местах отсутствия остатка и его наличия. При этом эффект виброизоляции может быть определен [4]

$$ВИ = -10 \lg |T|^2 \frac{m_2}{m_1}, \quad (3)$$

где m_1, m_2 — масса пластины на единицу площади в месте отсутствия остатка и его наличия; $|T|^2$ — осредненный по углу падения квадрат модуля коэффициента отражения.

Предварительно рассмотрим распространение упругих колебаний в цилиндрической оболочке.

Выбор формы цилиндрической оболочки соответствует форме объемов вагонов цистерн, в которых перевозят нефтепродукты, и резервуаров, в которых они хранятся. Анализ уравнений осесимметричных тонкостенных оболочек показывает, что на частотах ниже кольцевой частоты оболочки [4]

$$\omega_k = c_{\text{пл}}/R, \quad (4)$$

где $c_{\text{пл}}$ — скорость продольной волны в пластине, $c_{\text{пл}} = 5000$ м/с; R — радиус оболочки, при $k_{\text{пл}}R \ll 1$ (где $k_{\text{пл}}$ — волновое число продольной волны в пластине) в оболочке распространяется одна бегущая волна с волновым числом $\gamma_1 = k_{\text{пл}}$ и две неоднородных комплексно сопряженных волны с волновыми числами $\gamma_{2,3} = k_{2,3}(1 \pm i)$, $k_{2,3} = \sqrt[4]{3(1 - \mu^2)}/\sqrt{Rh}$.

На частотах выше кольцевой $\omega > c_{\text{пл}}/R$ в оболочке проявляются две бегущих осесимметричных волны (продольная и изгибная) и одна неоднородная [5].

На кольцевой частоте по периметру оболочки укладывается длина продольной волны в пластине, из которой изготовлена оболочка.

Для примера воспользуемся результатами расчета работы [6].

При ударном возбуждении цилиндрической оболочки $kR = 5,2$, $\beta = 20$ происходит энергетическое суммирование прямой и обратной изгибных волн (рис. 1, кривая 1), распространяющихся от точки возбуждения в двух противоположных направлениях (β — числовой коэффициент, зависящий от ширины полосы частот). Кривая 2 на рис. 1 получена энергетическим суммированием всех волн S_o , определяющихся с заданной точностью. Точка наблюдения находилась на расстоянии $kh_o = 0,5$. Из сравнения кривых 1 и 2 видно, что разница между этими результатами невелика, и поэтому можно считать, что в данном случае поле изгибных волн оболочки определяется в основном двумя волнами.

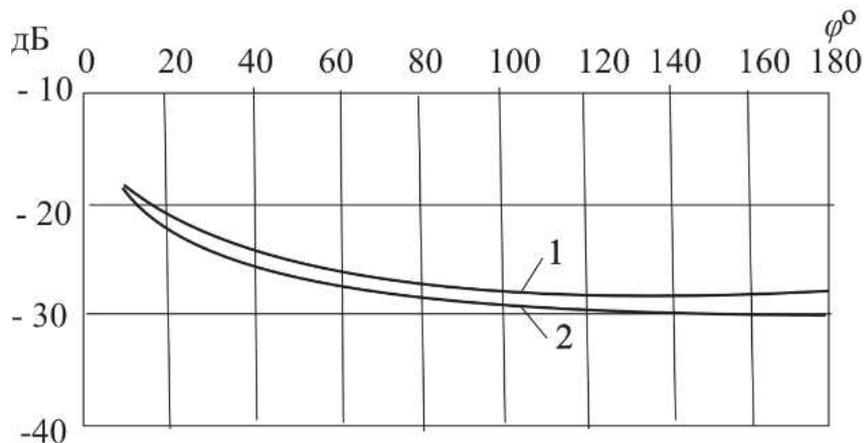


Рис. 1. Зависимость S_o в ближнем поле цилиндра ($kR = 5,2$, $\beta = 20$) 1 — энергетическое суммирование прямой и обратной волн изгиба; 2 — энергетическое суммирование всех волн изгиба.

Выражение для характеристического сопротивления круговой цилиндрической оболочки в воздухе по отношению к сосредоточенной силе радиального направления имеет вид [7]:

$$Z_{F_1}^{o6} = 4\sqrt{2}(1 - i)\sqrt{mD}\sqrt{f_k/f} \text{ при } f < f_k, \quad (5)$$

где f_k — кольцевая частота оболочки радиусом R , равная отношению скорости продольных волн к длине ее окружности $f_k = c_{\text{пр}}/2\pi R$.

В работе экспериментальные исследования наличия остатков нефтепродуктов в нефтетерминалах выполнялось на масштабной модели в виде цилиндрической оболочки с помощью датчиков виброускорения, установленных на корпусе цилиндрической оболочки. Сигналы с датчиков пропорциональны ускорению воздействующих на них механических колебаний.

При исполнении физических масштабных моделей упругих конструкций руководствуются известным соотношением модулей упругости и плотности материалов натуре и модели динамические характеристики конструкций на сопоставимых частотах совпадают. В связи с этим физическое моделирование получило широкое распространение при проведении исследований собственных колебаний пассивных колебательных систем. Результаты исследований собственных колебаний физических моделей конструкций, механизмов, сооружений и т.д. широко используют при решении научных и практических задач прочности конструкций, колеблющихся на собственных частотах, а также для исключения (отстройки) резонансных колебаний механизмов [8].

2. МЕТОД РЕШЕНИЯ

Для экспериментальных измерений временных спектральных и энергетических характеристик сигналов с акселерометров использовалась модель в виде цилиндра. Вид и размеры используемой модели представлены на рис. 2.



Рис. 2. Вид и размеры используемой модели.

Коэффициент масштабного физического моделирования относительно нефтяного терминала составляет: 1 — по высоте $K_H = 40$; 2 — по диаметру $K_R = 60$; 3 — по толщине стенки $K_h = 62$. Кольцевая частота модели рассчитана по формуле

$$f_k = \frac{c_{с.пл}}{2\pi R}, \quad (6)$$

где $c_{с.пл}$ — скорость продольной волны в пластине (для стали $c_{с.пл} = 5000 \text{ м/с}$), $f_k = 5750 \text{ Гц}$.

Скорость изгибной волны определяется выражением

$$c_{и.пл} = 10^2 \sqrt{h \cdot f}, \quad (7)$$

где h — толщина пластины (оболочки), м; f — частота, Гц.

Выражение (7) показывает дисперсионную зависимость скорости изгибной волны от частоты. Для частоты $f = 10 \text{ Гц}$, $h = 0,15 \text{ мм}$, $R = 0,14 \text{ м}$ $c_{и.пл} = 12 \text{ м/с}$, $c_{с.пл} = 5000 \text{ м/с}$. Кольцевая частота при $R = 0,14 \text{ м}$ $f_k = 5750 \text{ Гц}$.

Время, когда на длине радиуса оболочки укладывается одна изгибная волна $t_{изг1} = \frac{2\pi R}{c_u} = 12$ м/с, что соответствует частоте $f_k = \frac{1}{t_{изг1}} = 14$ Гц.

При выполнении измерений вибрационных характеристик с датчиков A_1 и A_2 (см. рис. 2) использовалось ударное возбуждение в точке 0.

Ударное возбуждение модели осуществлялось стальной сферой радиусом $R_{сф} = 0,5$ см. Для исключения влияния разброса спектров различных ударов на измерение взаимных спектров вибраций с датчиков ввод сигналов в компьютер осуществлялся с двух датчиков за один удар с помощью аппаратуры *National Instrument* типа *USBX SERIES Multifunction DAQ*.

Некоторые конструкции, такие как стенки топливных и других цистерн и обшивка корпуса ниже ватерлинии, соприкасаются с жидкостью. К подобным конструкциям относятся также стержни трубопроводов гидравлических судовых систем, по которым перекачивается жидкость. Для изгибных (поперечных) колебаний таких конструкций характерно увеличение их массы за счет участия в этих колебаниях определенного количества жидкости. Указанную часть жидкости называют соколеблющейся, или присоединенной массой. При расчете упомянутых выше колебаний она добавляется к массе конструкции. При наличии в оболочке (цилиндра) жидкости масса этой жидкости добавляется к массе цилиндра на частоте ниже f_o , равной $f_o = c_o/6R$ (c_o — скорость звука в жидкости; R — оболочки).

На рисунках 3 и 4 представлены экспериментальные кривые прогиба оболочки без наполнителя при ее точечном возбуждении на удалении от центра оболочки [9].

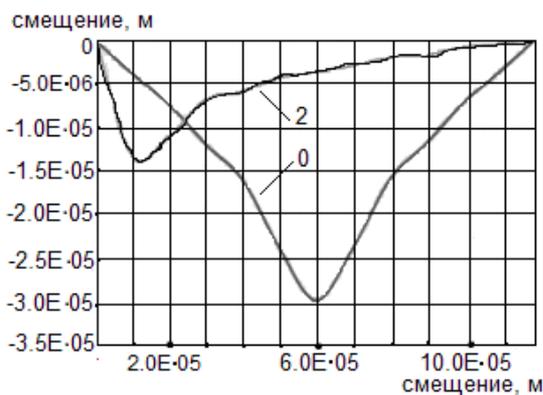


Рис. 3. Кривые прогиба по образующей оболочки при действии точечной силы в центре (точка 0) и у кромки оболочки (точка 2).

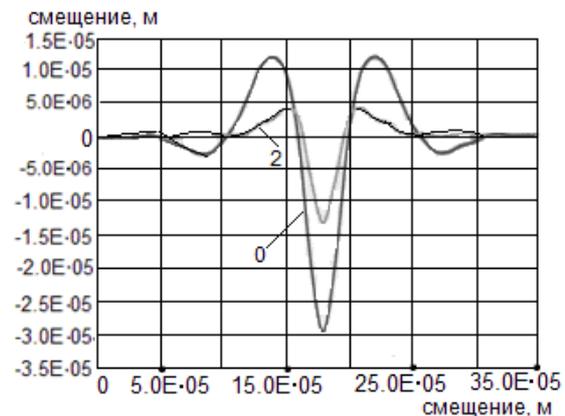


Рис. 4. Кривые прогиба по окружности оболочки при действии точечной силы в центре (точка 0) и у кромки оболочки (точка 2).

Присоединение небольших дополнительных масс значительно изменяет схему узловых линий оболочки, даже если влияние массы на собственную частоту мало заметно. Указанное явление хорошо согласуется с результатом работы [10], авторы которой изучали колебания пластины с сосредоточенной массой.

3. ВИДЫ МАТЕРИАЛОВ ДОННЫХ СЛОЕВ

В качестве исследуемой вибрационной характеристики был выбран частотный спектр входной вибровозбудимости. В таблице 1 представлены виды материалов донных слоев, с которыми выполнялись экспериментальные исследования, а также резонансные характеристики сигналов вибросмещения.

Полученные резонансные частоты по спектрам сигналов вибросмещения оболочки с учетом временного возбуждения соответствуют резонансной частоте изгибной волны по радиу-

Таблица 1. Виды материалов и их характеристики

Вид материала слоев	Объемная плотность ρ кг/м ³ ·10 ³	Коэффициент поглощения ($f = 100$ Гц)	Временная длительность сигнала виб- росмещения оболочки при ударе, с		Частота резо- нанса сигнала виброускорения, Гц	Уменьшение энергии удара возбуждения (датчик 1) (по прогибу), дБ
			Датчик			
			1	2		
воздух	$0,8 \div 1,0 \cdot 10^{-3}$	–	0,7		8,15	0
вода	$0,7 \div 1,2$	$0,02 \cdot 10^{-3}$	0,12	0,25	8,75	– 1,42
сухой песок	2,2	0,05	0,4	0,5	12,5	– 3,8
мокрый песок	0,92	0,07	0,7	0,7	14	– 6,3
осадки твёрдого мазута	1,8	$0,15 \cdot 10^{-3}$	0,73	0,76	–	– 2,5
застывшее дизельное топливо	1,4	$0,1 \cdot 10^{-3}$	0,85	0,85	–	– 1,8

су цилиндра. Величина снижения энергии удара возбуждения оболочки рассчитывалась из условия, что толщина присоединенной массы равна одной шестой длины изгибной волны в пластине на частоте $f = 10$ Гц [7].

Следует отметить, что несмотря на то, что проблема ударного возбуждения конструкций представляет собой важный раздел для исследования, общепринятое научное определение удара отсутствует [11].

Величина энергии удара характеризует вибровозбудимость оболочки и зависит от величины входного кинетического сопротивления оболочки в точке удара. В работе выбор параметра энергии удара определяется выражением

$$S = \int_0^t |F(t)|^2 dt, \quad (8)$$

где $|F(t)|$ — амплитуда вибросмещения оболочки во времени при импульсном ударе.

Выбор параметра энергии удара согласно выражению (8) обусловлен сложностью определения колебательных мощностей продольных и изгибных волн, распространяющихся по пластинам и оболочкам. Для определения колебательных мощностей в пластине (оболочке) требуется определение 19 кинематических параметров перемещений, углов поворота, производных второго и третьего порядка от перемещений. Все это требует решения комплекса вопросов, связанных с выбором типов датчиков, их количества и мест установки, разработки алгоритмов проведения измерений и обработки результатов [8].

На рисунках 5–7 представлены спектры виброускорения с датчиками 1 и 2 для различных веществ в слое.

Спектры представлены в полосе частот $\Delta f_c = 1,0$ Гц.

Отметим, что частоты спектров виброускорения больше частот спектров вибросмещения на величину ω^2 . Погрешность определения спектров вибросмещения по сигналам с датчиков

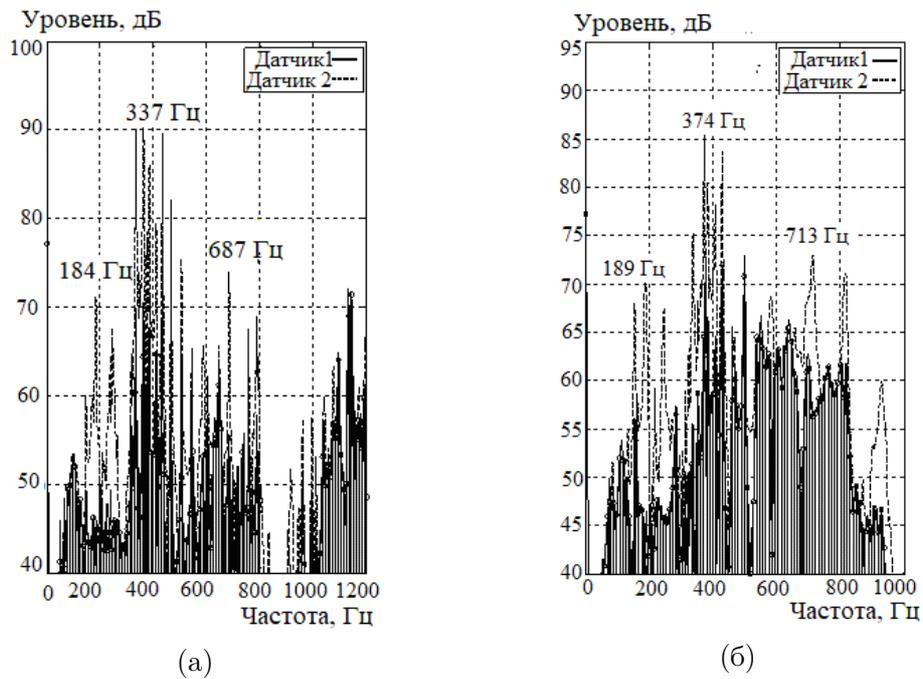


Рис. 5. Спектры виброускорения для оболочки без наполнителя (а) и со слоем воды (б).

виброускорения связана с аппаратурной погрешностью интегрирования, определяющей связь между виброускорением и вибросмещением.

При выполнении измерений преобразование сигналов виброускорения в сигналы вибросмещения использовался интегрирующий усилитель типа 00028 фирмы VEB ROBOTRON.

Представленные спектры в полосе частот $\Delta f = 0 \div 1000$ Гц меньше ширины возбуждаемых частот. Выбранный диапазон частот обусловлен доминирующей энергией возбуждения в указанном диапазоне частот и требованием лучшей наглядности на рисунке.

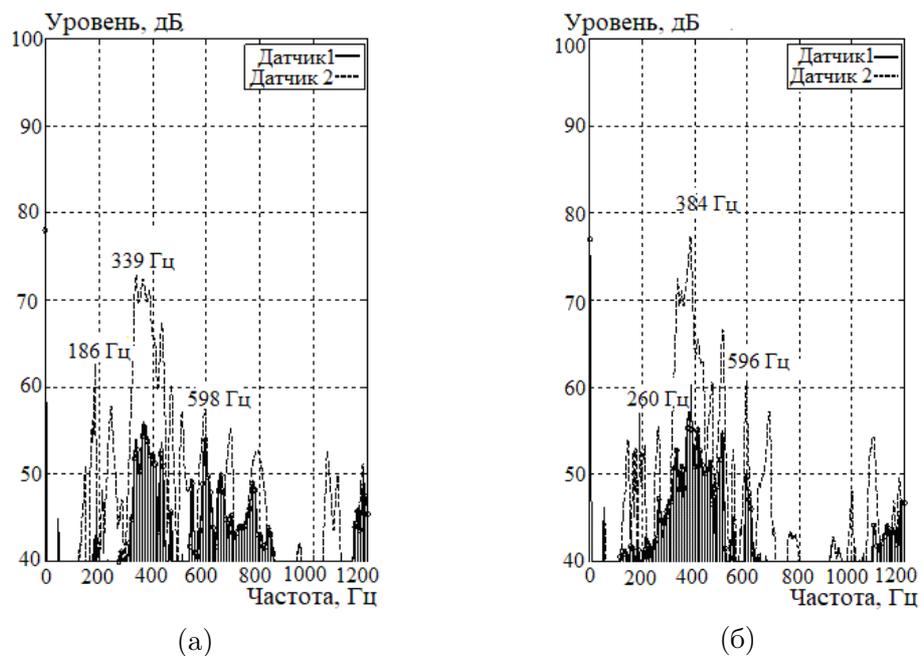


Рис. 6. Спектры виброускорения для оболочки с сухим песком (а) и с мокрым песком (б).

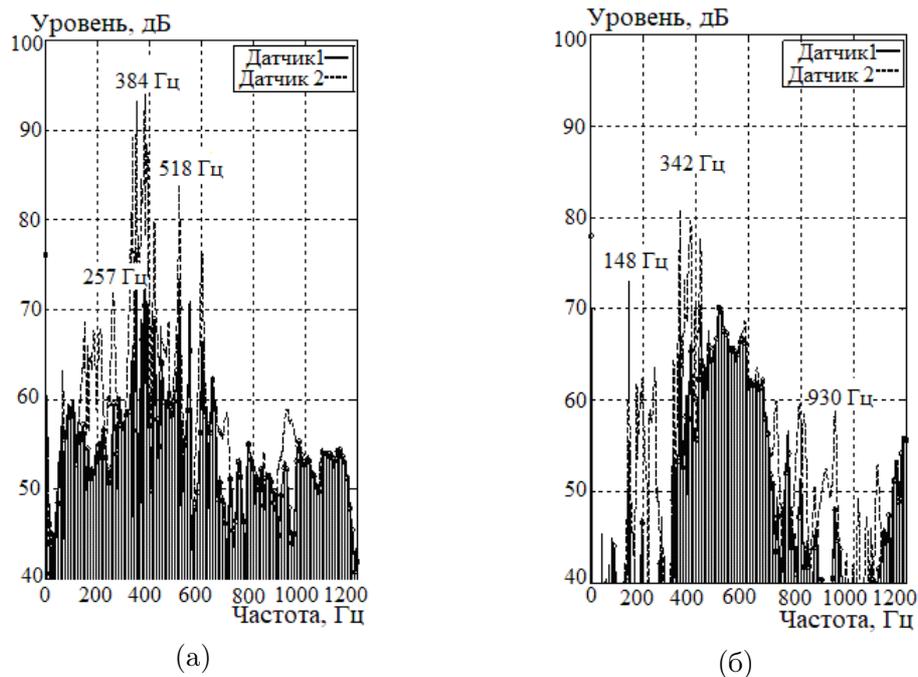


Рис. 7. Спектры виброускорения для оболочки с осадком мазута (а) и с осадком дизельного топлива (б).

Снижение колебательной мощности μ для различных наполнителей с величиной слоя $h_c = 0,04$ м при массе оболочки $m_o = 4,65$ кг по сравнению с оболочкой без наполнителя составляет:

1. Вода $\mu_1 = \frac{m_o}{\pi R^2 \rho_{\text{в}} h_c + m_o} = 0,61 = 2,0$ дБ.
2. Сухой песок $\mu_2 = \frac{m_o}{\pi R^2 \rho_{\text{сп}} h_c + m_o} = 0,46 = 6,7$ дБ, $\rho_{\text{сп}} = 2,2 \cdot 10^3$ кг/м³.
3. Мокрый песок $\mu_3 = \frac{m_o}{\pi R^2 \rho_{\text{мп}} h_c + m_o} = 0,4 = 7,9$ дБ, $\rho_{\text{мп}} = 2,8 \cdot 10^3$ кг/м³.
4. Осадок мазута $\mu_4 = 4,3$ дБ, $\rho_c = 1,8 \cdot 10^3$ кг/м³.
5. Застывшее дизельное топливо $\mu_5 = \frac{m_o}{\pi R^2 \rho_{\text{г}} h_c + m_o} = 3,2$ дБ, $\rho_{\text{г}} = 1,4 \cdot 10^3$ кг/м³.

Как следует из результатов расчета, максимальное снижение колебательной мощности в оболочке при ударном возбуждении наблюдается при остатке в виде мокрого песка. Это соответствует максимальной присоединенной массе остатка.

Сравнение расчетных данных с результатами измерений подтверждает снижение входной мощности при ударе в зависимости от присоединенной массы. Погрешность в оценках обусловлена влиянием торца донной поверхности цилиндра и величиной расчета удельной плотности наполнителей (мокрый песок, твердый остаток мазута, застывшее дизельное топливо).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе по результатам экспериментальных измерений спектральных и временных характеристик, полученных с датчиков виброускорения как результат ударного возбуждения цилиндрической оболочки с различными видами веществ, близких по параметрам с остатками нефтепродуктов в нефтяных резервуарах, определены параметры вибрационных характеристик, по которым можно классифицировать виды донных остатков нефтепродуктов. Анализ полученных спектров позволяет сделать следующие выводы:

1. Амплитуды спектров для каждого вещества больше на датчике, расположенном выше слоя.

2. Полученный результат обусловлен большими потерями вибрационной энергии в слое, по сравнению с потерями в воздухе.

3. Наибольшие потери в слое сухого песка.

4. Максимальная ширина спектра наблюдается для оболочки без накопления.

Показано, что классификационными признаками остатков нефтепродуктов могут быть приняты резонансные частоты, ширина спектров сигналов вибраций виброускорения и вибро смещения оболочки при ударе.

Окончательный вывод будет представлен по результатам натуральных испытаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник по судовой акустике / Под ред. И. И. Клюкина и И. И. Боголепова. — Л. : Судостроение, 1978. — 503 с.
2. Квет, В. Ф. Особенности акустического профилирования донных отложений в больших нефтяных резервуарах / В. Ф. Квет, С. А. Цысаров // Акустический журнал. — 2018. — Т. 64, вып. 1. — С. 112–118.
3. Колыхалин, В. М. Различные способы акустической диагностики твердого остатка нефтепродуктов в железнодорожных цистернах / В. М. Колыхалин // Известия Самар. науч. центра РАН. Спец. вып. ELPIT-2005. — 2005. — С. 97–101.
4. Ляпунов, В. Т. Виброизоляция в судовых конструкциях / В. Т. Ляпунов, А. С. Никифоров. — Л. : Судостроение, 1975. — С. 91–93.
5. Ляпунов, В. Т. Резиновые виброизоляторы: Справочник / В. Т. Ляпунов, Э. Э. Лавендел, С. А. Шляпочников. — Л. : Судостроение, 1988. — С. 48–53.
6. Романов, В. Н. Излучение звука элементами судовых конструкций / В. Н. Романов, В. С. Иванов. — СПб. : Судостроение, 1993. — С. 103–106.
7. Кирпичников, В. Ю. Возбудимость конструкций и пути её уменьшения / В. Ю. Кирпичников. — СПб. : Издание ФГУП “Крыловский государственный научный центр”, 2014. — С. 27–30.
8. Попков, В. И. Колебания механизмов и конструкций / В. И. Попков, С. В. Попков. — СПб. : Сударыня, 2009. — 490 с.
9. Хомченко, А. М. К задаче определения частот и форм колебаний оболочек, несущих сосредоточенные массы / А. М. Хомченко, А. С. Христенко // Труды Николаевского кораблестроительного института. — 1972. — вып. 56. — С. 145–148.
10. Форрестол. Реакция погружения цилиндрической оболочки на воздействие распространяющейся в осевом направлении ступенчатой волны / Форрестол, Херрманн // Прикладная механика. — 1965. — № 4. — С. 35–37.
11. Ефремов, Н. К. Критериальные оценки механического удара / Н. К. Ефремов // Наука и Образование. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Электрон. журн. — 2016. — № 08. — С. 104–120.

REFERENCES

1. Directory on ship acoustics. Edited by I.I. Klyukin and I.I. Bogolepov. [Spravochnik po sudovoj akustike / Pod red. I.I. Klyukina i I.I. Bogolepova]. Leningrad, 1978, 503 p.
2. Kvet V.F., Cysarov S.A. Acoustic Profiling of Bottom Sediments in Large Oil Storage Tanks. [Kvet V.F., Cysarov S.A. Osobennosti akusticheskogo profilirovaniya donnyh otlozhenij v bol'shikh neftyanyh rezervuarah]. *Akusticheskij zhurnal — Acoustical Physics*, 2018, vol. 64, no. 1, pp. 112–118.
3. Kolykhalin V.M. Different ways of acoustic diagnostics of the solid oil rest in railway tanks. [Kolykhalin V.M. Razlichnye sposoby akusticheskoy diagnostiki tverdogo ostatka nefteproduktov v zheleznodorozhnyh cisternah]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra RAN. Special'nyj vypusk ELPIT-2005 — Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*.

ELPIT-2005 special edition, 2005, pp. 97–101.

4. Lyapunov V.T., Nikiforov A.S. VibroIsolation in ship constructions. Directory. [Lyapunov V.T., Nikiforov A.S. Vibroizolyaciya v sudovyh konstrukciyah]. Leningrad, 1975, pp. 91–93.

5. Lyapunov V.T., Lavendel E.E., Shlyapochnikov S.A. Rubber vibroinsulator. Directory. [Lyapunov V.T., Lavendel E.E., Shlyapochnikov S.A. Rezinovye vibroizolyatory: Spravochnik]. Leningrad, 1988, pp. 48–53.

6. Romanov V.N., Ivanov V.S. Sound radiation by the ship element constructions. [Romanov V.N., Ivanov V.S. Izluchenie zvuka elementami sudovyh konstrukcij]. SPb., 1993, pp. 103–106.

7. Kirpichnikov V.Y. Excitability of constructions and ways of its reduction. [Kirpichnikov V.Yu. Vozbudimost' konstrukcij i puti eyo umen'sheniya]. SPb., 2014, pp. 27–30.

8. Popkov V.I., Popkov S.V. Fluctuations of mechanisms and constructions. [Popkov V.I., Popkov S.V. Kolebaniya mekhanizmov i konstrukcij]. SPb., 2009, 490 p.

9. Homchenko A.M., Hristenko A.S. To a problem of definition of frequencies and fluctuation forms of the tanks bearing concentrated weights. [Homchenko A.M., Hristenko A.S. K zadache opredeleniya chastot i form kolebanij obolochek, nesushchih sosredotochennye massy]. *Trudy Nikolaevskogo korablestroitel'nogo instituta — Proceedings of the Nikolaev Shipbuilding Institute*, 1972, iss. 56, pp. 145–148.

10. Forrestol and Herrmann. Reaction of immersing of a cylindrical tank to influence of a step wave extending in an axial direction. [Forrestol, Herrmann Reakciya pogruzheniya cilindricheskoj obolochki na vozdeystvie rasprostranyayushchejsya v osevom napravlenii stupenchatoj volny]. *Applied mechanics — Prikladnaya mekhanika*, 1965, vol. 4, pp. 35–37.

11. Efremov N.K. Criterion estimations of mechanical impact. [Efremov N.K. Kriterial'nye ocenki mekhanicheskogo udara]. *Science and education. MSTU named after N.E. Bauman. Electronic journal — Nauka i Obrazovanie. MGTU im. N.E. Baumana. Elektron. zhurnal*, 2016, no. 8, pp. 104–120.

Клещев Александр Александрович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики Санкт-Петербургского государственного морского технического университета, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: alexalex-2@yandex.ru

Kleshchev Alexandr Alexandrovich, Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Saint-Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia
E-mail: alexalex-2@yandex.ru

Кольхалин Виталий Михайлович, кандидат технических наук, начальник смены, Петербургский нефтяной терминал, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: cap-007@mail.ru

Kolykhalin Vitaly Mihaylovich, Candidate of Technical Sciences, Manager of the Department operative, St. Petersburg Oil Terminal, St. Petersburg, Russia
E-mail: cap-007@mail.ru

Майоров Василий Семенович, доктор технических наук, старший научный сотрудник, главный научный сотрудник, ФГУП “Крыловский государственный научный центр”, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: fizika@smtu.ru

Mayorov Vasily Semenovich, D. Sc., Senior Scientist, Head of Acoustic Laboratory at the Department of the Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia
E-mail: fizika@smtu.ru

*Пересёлков Сергей Алексеевич, доктор физ.-мат. наук, заведующий кафедрой математической физики и информационных технологий ВГУ, Воронеж, Россия
E-mail: pereselkov@yandex.ru*

*Pereselkov Sergey Alexeevich, Head of the Department of Mathematical Physics and Information Technology, Voronezh State University, Voronezh, Russia
E-mail: pereselkov@yandex.ru*

*Ткаченко Сергей Александрович, аспирант кафедры математической физики и информационных технологий ВГУ, Воронеж, Россия
E-mail: sega-tk@mail.ru*

*Tkachenko Sergey Alexanderovich, Postgraduate Student Department of Mathematical Physics and Information Technology, Voronezh State University, Voronezh, Russia
E-mail: sega-tk@mail.ru*