

УДК 534.22

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕДАЧИ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ЧЕРЕЗ МНОГОСЛОЙНУЮ СИСТЕМУ ДЛЯ ИЗМЕНЕНИЯ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ УГЛЕВОДОРОДОВ

Азин Антон Владимирович¹,
antonazin@mail.ru

Богданов Евгений Петрович²,
epbogdanov@mail.ru

Рикконен Сергей Владимирович¹,
rikk2@yandex.ru

¹ Томский государственный университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью определения уровня акустической энергии ультразвукового излучения, проходящего через многослойную конструкцию. Знание уровня акустической энергии актуально для проектирования ультразвуковых установок по изменению реологических свойств углеводородных топлив при эксплуатации энергетических объектов в условиях Арктики и Антарктики.

Цель состоит в разработке математической модели распространения ультразвукового излучения в многослойной системе с определением энергии в каждом слое при учете конструкции ультразвукового излучателя резонансного типа.

Объекты: ультразвуковой излучатель резонансного типа, многослойная система, физическая модель системы «ультразвуковой излучатель – многослойная система».

Методы: математическое моделирование распространения ультразвукового излучения в многослойной системе, учитывающее влияние: конструкции ультразвукового излучателя резонансного типа, его режима работы, количество слоев и механические свойства материалов многослойной системы; экспериментальные исследования на основе физической модели системы «ультразвуковой излучатель – многослойная система»; верификация математической модели на основе полученных экспериментальных данных.

Результаты. Разработанная математическая модель позволяет определить энергию и частотные характеристики акустического излучения в каждом слое многослойной системы. Знание уровня акустической энергии при дальнейших исследованиях позволит определить изменения реологических свойств среды, в том числе и от нагрева. Проведены экспериментальные исследования работы ультразвукового излучателя резонансного типа при нагрузке в виде одного слоя полиметилметакрилата, двух слоев полиметилметакрилата и трех слоев полиметилметакрилата. Расчетные данные согласуются с экспериментальными, погрешность не превышает 15 %.

Выводы. Разработанная математическая модель позволяет спроектировать конструкцию ультразвукового излучателя резонансного типа и подобрать по мощности и диапазону частот необходимый источник питания для лабораторных исследований углеводородного сырья.

Ключевые слова:

излучатель, энергия излучения, интенсивность излучения, стоячие волны, отраженные волны, интерференционная картина, частотные характеристики, многослойная система.

Введение

Устройства, выполненные на основе ультразвуковых (УЗ) технологий, могут вполне конкурировать в передаче энергии с другими неконтактными способами воздействия на твердые тела, такими как электромагнитные и электростатические устройства. Устройства, основанные на акустической передаче энергии, позволяют совершать определенную работу (сварку, полимеризацию, плавление, изменение реологических свойств углеводородных сред: изменения вязкости, температуры кипения, температуры застывания, изменения времени тиксотропии) в определенном (замкнутом) пространстве на расстоянии от излучателя [1–5].

Наличие надмолекулярной структуры углеводородных жидкостей вызывает ряд проблем, возникающих в процессе добычи, перекачки и переработки данного сырья. Для перечисленных технологических

процессов это выражается в изменении реологических свойств: высокой вязкости, высокой (положительной) температуре застывания и отложения парафина на оборудовании и трубопроводе. В настоящее время применяют ряд методов для подготовки высоковязкой нефти к транспорту: термический, химический и метод физических воздействий. На сегодняшний день физические методы находят все более широкое применение в нефтяной промышленности из-за их эффективности, экономичности и доступности [1–5]. Одним из физических методов является метод ультразвукового воздействия на углеводородное сырье. Теме воздействия ультразвука на углеводородные среды посвящено достаточно много научно-технических работ [1–10]. В этих работах показано влияние УЗ на реологические свойства углеводородной среды. Эффект воздействия ультразвука связан с уровнем акустической энергии, переданной в среду.

Для проектирования конкретных устройств, предназначенных для подготовки нефти и углеводородных топлив к транспорту, подготовки топлив к сжиганию, подготовки масел к эксплуатации в условиях Арктики и Антарктики, требуется знать уровни акустической энергии во всех элементах рассматриваемой конструкции. Обычно влияние УЗ излучения на нефть и нефтепродукты изучают и дают рекомендации по проектированию УЗ устройств по результатам лабораторных исследований. Исследуемая нефть в лабораторных условиях находится в многослойных кюветах из оргстекла. Эти исследования для разных углеводородных сред носят сравнительный характер и не позволяют определять действительную энергию, сообщенную среде. Поэтому расчет акустической энергии, сообщенной в многослойную среду, является актуальной задачей.

Целью исследования является разработка математической модели распространения ультразвукового излучения в многослойной системе с определением энергии излучения в каждом слое (оргстекла, углеводородной среды, стали, разнообразных покрытий и т. д.) при учете конструкции УЗ излучателя резонансного типа.

Расчет энергии излучения, сконцентрированной в слое углеводородной среды, позволит в дальнейшем определиться с такими физическими процессами в среде, как: скорость акустического течения; акустическая кавитация и нагрев среды с изменением её реологических свойств [1–5].

Разработка математической модели распространения ультразвукового излучения в многослойной системе

Для проектирования ультразвуковых систем необходимо учитывать волновую картину процесса передачи энергии, зависимость от соотношения длины волны и толщины слоя сплошной среды, в которой распространяется звуковая энергия. Также необходимо учитывать соотношение диаметра излучателя и длины волны для определения диаграммы направленности устройства. Важным моментом является поглощение энергии в среде, которое существенно изменяет интерференционную картину процесса передачи энергии. При близких значениях длины волны и толщины слоя материала волновая (интерференционная) картина усложняется [7, 11–14]. Учет интерференционных процессов и процесса поглощения в многослойной системе вызывает существенные трудности при расчете режимов передачи энергии от источника энергии в конкретный слой многослойной системы.

В связи с этим для математического моделирования многослойной системы принят ряд допущений:

- в соответствии с [15] торец толкателя УЗ излучателя может быть представлен в виде простейшего поршня излучения, то есть когда на плоскости контакта задано равномерное распределение давления или скорость частиц без учета отраженных волн на излучатель. При этом допущении взаимодействие УЗ излучателя резонансного типа и многослойной системы можно рассматривать в одномерном виде;

- распространение акустической энергии происходит по оси толкателя УЗ излучателя, круговая форма и наличие лепестков диаграммы направленности не учитываются;
- источник энергии является источником бесконечной мощности;
- физическая картина соответствует представлению слоя сосредоточенными параметрами, поэтому поглощение и интенсивность относятся ко всему слою;
- переходные процессы не рассматриваются;
- входной электрический сигнал представляет собой синусоиду, и все расчетные переменные носят синусоидальный характер на всех частотах;
- в результате расчетов получаются амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) ускорения и интенсивности излучения в слоях системы без учета вторичных отраженных волн в слоях;
- рассматривается случай жесткого соединения поверхности излучателя и поверхности многослойной системы, ударные взаимодействия этих поверхностей исключены;
- излучатель совершает перемещения, равные единицам нанометров, поэтому в модели принято допущение, что материалы контактирующих элементов деформируются в зоне упругости и изменение напряженно-деформированного состояния в зоне контакта излучателя и толкателя не учитывается.

Представление акустического излучения в одномерной форме в виде плоской волны в пространстве при перечисленных допущениях позволяет представить УЗ излучатель и многослойную «нагрузку» в виде обобщенной одномерной колебательной системы [6, 11–14, 16, 17].

В этом случае для анализа акустической энергии применимы основные принципы работы энергетических систем:

- все элементы акустической системы представляют собой единую систему и охвачены единым режимом работы, рассмотрение системы по частям вносит в решение существенные погрешности в вычислениях;
- строгое соблюдение энергетического баланса (выработанная энергия равна сумме работы в намеченной точке пространства плюс все потери при передаче и преобразовании энергии).

На рис. 1 представлен УЗ излучатель резонансного типа на основе многослойного пьезоактюатора АПМ 2-7. УЗ излучатель резонансного типа состоит из: корпуса УЗ излучателя – 1; винта – 2 и гайки – 3 предварительного поджатия; центраторов – 4, 9; стальной щеки – 5; многослойного пьезоактюатора – 6; смотровых окон – 7 в корпусе УЗ излучателя; датчика силы – 8; толкателя – 10; упругости – 11.

Разработанная одномерная математическая модель позволяет смоделировать передачу акустической энергии от ультразвукового излучателя резонансного типа в многослойную систему.

Данная математическая модель описывает УЗ излучатель резонансного типа в работе на многослойную систему.

Модель позволяет учитывать следующие колебательные процессы:

- колебания подсистемы «толкатель–упругость»;
- колебания подсистемы «корпус – упругость корпуса»;
- колебания подсистемы многослойного пьезоактюатора;
- распространение ультразвука в слоях с учетом интерференционной картины и поглощения в слоях.

Амплитуда колебаний толкателя УЗ излучателя определяется суммарным импедансом устройства с учетом нагрузки в точке контакта. Далее энергия распространяется волновым процессом через элементы конструкции с учетом плотности и скорости звука конкретного слоя, длины волны и толщины слоя.

Толкатель, упругость и упругое полупространство нагрузки образуют колебательную подсистему «толкатель–упругость».

В модели необходимо учитывать колебания подсистемы «корпус – упругость корпуса», потому что амплитуда колебаний толкателя соизмерима с деформацией корпуса УЗ излучателя, следовательно, колебания части массы корпуса на жесткости конструкции корпуса необходимо учитывать в колебательном процессе.

Пьезоактюатор состоит из нескольких пьезоэлементов. Каждый пьезоэлемент имеет массу и упругость, и поэтому пьезоактюатор с точки зрения теории колебаний является сложным элементом.

С учетом этих особенностей УЗ излучатель создает колебательный процесс, который выражается в виде амплитуды колебаний и амплитуды ускорений колебаний толкателя. Далее колебательная энергия в многослойном упругом полупространстве (многослойная система) представляется как поток мощности.

Колебания толкателя УЗ излучателя резонансного типа определяются вязкоупругими свойствами колебательной системы излучателя с учетом нагрузки. Зона контакта толкателя УЗ излучателя с упругим полупространством описывается параметрами: упругость материала полупространства c_n , присоединенная мас-

са m_n , коэффициент диссипации r_n [1–5, 8, 11, 14, 18]. Зона контакта обозначена красным цветом на рис. 1.

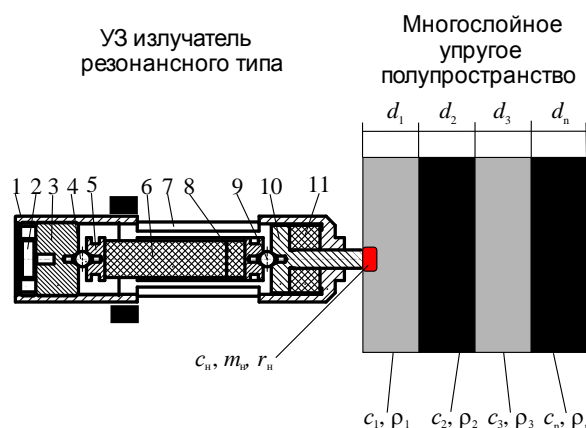


Рис. 1. Схема взаимодействия УЗ излучателя и многослойного упругого полупространства

Fig. 1. Scheme of interaction between an ultrasonic emitter and a multilayer elastic half-space

Колебания толкателя УЗ излучателя создают волновой фронт в многослойной среде. При условии строго направленного излучения по основной оси диаграммы направленности этот фронт можно представить плоской волной [1–5, 9–14, 16–19]. Одномерные волны – это волны, в которых все характеристики зависят от времени и одной координаты. От УЗ излучателя энергия распространяется в виде упругих волн в многослойной системе. При допущении малости отраженных волн в первом слое УЗ излучатель можно представить как одномерную колебательную систему в виде электрической схемы замещения (рис. 2) [1–7, 19–22]. На рис. 2 приведена электрическая схема замещения акустической системы УЗ излучателя резонансного типа с учетом пьезоактюатора АПМ-2-7, упругости, упругой деформации корпуса УЗ излучателя, акустической нагрузки и излучения в многослойную систему [1–5, 13]. Подобная, но бесконтактная система представлена в работе [1].

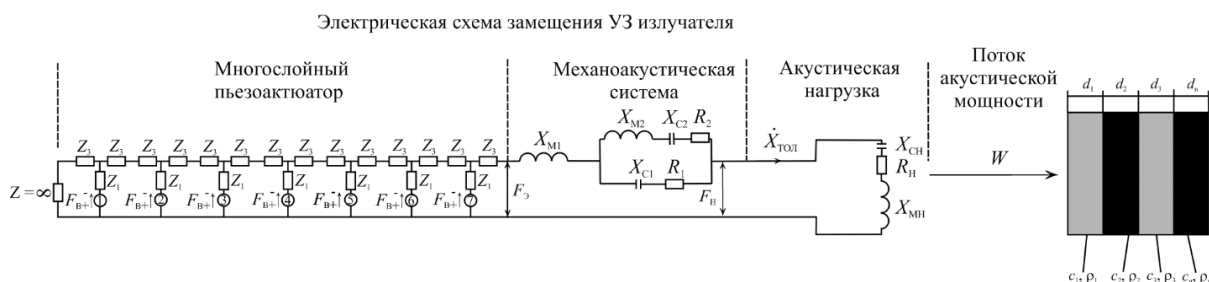


Рис. 2. Электрическая схема замещения УЗ излучателя резонансного типа

Fig. 2. Electrical scheme for ultrasonic resonant emitter substitution

В бегущей плоской волне модуль вектора мгновенного значения потока мощности W_i равен [5–7]:

$$W_i = PV = \frac{1}{\rho c} P^2 = \rho c V^2 = \rho c \omega^2 A_i^2, \text{ Вт/м}^2, \quad (1)$$

где P – давление (Па); V – скорость среды (м/с); ρ – плотность среды (кг/м³); c – фазовая скорость волны

(м/с); ω – угловая частота (1/с); A_i – мгновенная амплитуда колебаний среды (м). Для удобства расчета энергии в слоях колебания толкателя УЗ излучателя с конечной площадью условно переносятся на условный метр квадратный. Исходя из формулы (1), можно получить описание бегущей волны.

Фронты гармонических бегущих волн – это поверхности равных фаз, которые описываются функцией:

$$W_i = p_m \cos(\omega t - \varepsilon) \dot{X}_m \cos(\omega t - \varepsilon - \varphi) = \frac{1}{2} p_m \dot{X}_m [\cos \varphi + \cos(2\omega t - 2\varepsilon - \varphi)]. \quad (2)$$

Первое слагаемое в (2) дает постоянный поток мощности, производящий накапливающуюся с течением времени работу, второе слагаемое даёт в среднем за период по времени нуль. Данное положение вполне согласуется с работой [8].

Произведение $1/2 p_m \dot{X}_m$ обычно называют полной мощностью системы. В этом случае удобно принять, что полная мощность состоит из двух составляющих – активной и реактивной мощностей:

- активная мощность процесса

$$W_a = \frac{1}{2} p_m \dot{X}_m \cos \varphi,$$

- реактивная мощность

$$W_r = \frac{1}{2} p_m \dot{X}_m \cos(2\omega t - 2\varepsilon - \varphi).$$

Для определения плотности потока энергии волны используется вектор Умова P , направленный в сторону распространения волны (т. е. перпендикулярно волновой поверхности), величина которого равна произведению объемной плотности энергии W и скорости распространения волны c .

Средняя интенсивность волны [1–5, 8] равна среднему значению модуля вектора Умова и определяется из выражения (3):

$$\bar{I} = \langle P \rangle = \langle W_i \rangle \times c, \quad (3)$$

где $\langle P \rangle$ – среднее значение модуля вектора Умова; $\langle W_i \rangle$ – среднее значение мгновенной полной звуковой мощности; c – фазовая скорость.

Средняя интенсивность для плоской волны равна [1, 6, 7]:

$$\bar{I} = \frac{1}{2} c \rho \omega^2 A^2, \text{ Вт/м}^2. \quad (4)$$

Средняя интенсивность звуковой волны по формуле (4) определяется как средний поток энергии через единицу площади волнового фронта в единицу времени. Если взять единичную площадь волнового фронта, которая полностью поглощала бы звук, и расположить её перпендикулярно направлению распространения волны, то интенсивность звука равна акустической энергии, поглощаемой за одну секунду [1, 6, 7, 11]. Размерность интенсивности совпадает с размерностью потока мощности. Интенсивность звука представляет собой активную составляющую удельной мощности звуковых колебаний. Реактивная составляющая мощности колебаний непрерывно колеблется в звуковом поле то в сторону распространения волны, то в обратную сторону. За период колебаний реактивная мощность равна 0. Эта часть мощности представляет собой запас энергии в звуковом поле, аналогичный запасу энергии в электрическом и магнитном полях электрического тока [1].

Для правильного понимания полной картины звукового поля и учета соотношения длины волны и толщины слоя необходимо учитывать все составляющие уравнения (1). Вектор Умова в диссипативной колебательной системе можно представить в виде, который будет зависеть от двойной фазы колебаний. Принимая во внимание (4), получается:

$$P_i = I_0 e^{i(\omega t - kx)} e^{i(\omega t - kx + \varphi)}, \text{ Вт/м}^2, \quad (5)$$

где P_i – мгновенное значение вектора Умова в слое; $I_0 = \dot{X}_0^2 p_0 c_0$ – амплитуда вектора Умова излучателя; k – волновое число; x – толщина слоя.

Рассмотрена задача распространения плоских волн в слоистой среде, образованной параллельными друг другу слоями вещества, имеющая важное значение для понимания проблемы прохождения звука [1]. Задача, в соответствии с (5), решается с учетом отраженных волн в слоях, но без учета полной интерференционной картины и поглощения звуковой энергии в слоистой среде. Имеется пятислойная акустическая конструкция (рис. 2), в которой c_i p_i – волновое сопротивление слоя; A_i – амплитуда колебаний падающих волн; B_i – амплитуда колебаний отраженных волн; k_i – волновое число слоя; d_i – толщина слоя.

Параметры материалов слоев при математическом моделировании и проведении экспериментов представлены в таблице.

Решение единой акустической системы УЗ излучателя при работе на многослойную конструкцию проводилось численным методом в пакете прикладных программ *Mathcad*.

Средняя интенсивность излучения \bar{I}_i , идущая от толкателя УЗ излучателя, будет зависеть от амплитуды колебаний толкателя ($X_{\text{тол}}$) и от волновых свойств рабочей среды [1, 3–5, 11, 14]:

$$\bar{I}_i = \frac{\rho_i \cdot c_i \cdot X_{\text{тол}}^2 \cdot \omega_i^2}{2}, \text{ Вт/м}^2. \quad (6)$$

Таблица. Параметры материалов слоев

Table. Layer material options

Индекс Index	Материал Material	Плотность Density ρ , кг/м ³ /kg/m ³	Скорость звука в материале c , м/с Acoustic speed c , m/s
1	Полиметилметакрилат Plexiglass	1,2·10 ³	2,71·10 ³
2	Воздух/Air	1,205	330
3	Полиметилметакрилат Plexiglass	1,2·10 ³	2,71·10 ³
4	Воздух/Air	1,205	330
5	Полиметилметакрилат Plexiglass	1,2·10 ³	2,71·10 ³

Рассчитывая вектор Умова по системе уравнений распространения волны в слоях, можно определить смещение и ускорение среды в каждом слое системы [1]. Смещение среды в конкретном слое по формуле (6) определяется по формуле:

$$X_i(\omega_{i+1}) = \sqrt{\frac{2 \cdot \bar{I}_i(\omega_{i+1})}{\omega_{i+1}^2 \cdot \rho_i \cdot c_i}}, \quad (7)$$

где $\bar{I}_i(\omega_{i+1})$ – средняя интенсивность излучения волны в i слое.

Ускорение поверхности i слоя определяется по формуле:

$$\ddot{X}_{i(i+1)} = X_i(\omega_{i+1}) \cdot \omega_{i+1}^2. \quad (8)$$

Операции по формулам (6)–(8) можно проводить только символическим методом, когда система является линейной, сигналы ускорения, скорости и смещения носят синусоидальный характер. Именно на основном резонансе замечается максимальное приближение этих сигналов к синусоиду, поэтому только на основном резонансе такая обработка сигналов правомерна.

Верификация математической модели

В разделе представлены результаты моделирования в виде АЧХ ускорения и средней интенсивности в слоях акустической системы в сравнении с экспериментальными данными для разных конструкций акустических систем: работа УЗ излучателя без нагрузки (режим КЗ, данные из [3]), нагрузка в виде одного слоя полиметилметакрилата (ПММА), нагрузка в виде двух слоев ПММА, нагрузка в виде трех слоев ПММА (рис. 3). Толщина слоя ПММА d_1 составляла 1 мм, толщина воздушной прослойки $d_{\text{воз}}$ составляла 0,1 мм.

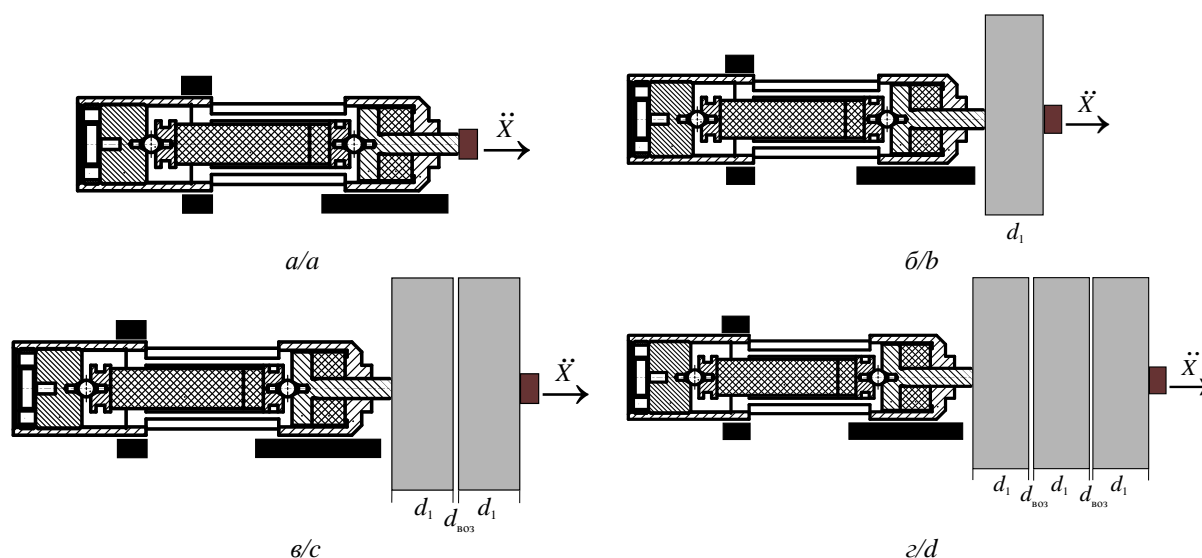


Рис. 3. Виды акустических систем: а) режим КЗ; б) нагрузка в виде одного слоя ПММА; в) нагрузка в виде двух слоев ПММА; г) нагрузка в виде трех слоев ПММА

Fig. 3. Types of acoustic systems: a) short circuit mode; b) one layer; c) two layers; d) three layers

Для верификации предложенной математической модели проведены исследования на экспериментальном стенде. Комплектация стенда и порядок проведения эксперимента подробно описаны в [5].

АЧХ нормальных акустических волн характеризуются наличием некоторого количества мод, которые определяются соотношением толщины слоя к длине волны [1, 10, 20–22]. Важной информацией для анализа структуры УЗ излучателя резонансного типа является получение АЧХ ускорения УЗ излучателя резонансного типа при работе в режиме короткого замыкания (КЗ) (без многослойной системы). В этом случае акселерометр устанавливается на торце толкателя, а АЧХ снимается в частотном диапазоне с явным проявлением резонансных явлений – максимальная амплитуда сигнала ускорения, форма сигнала ускорения близка к синусоиде [3]. На рис. 4 представлены результаты численного расчета по предложенной математической модели в сравнении с полученными экспериментальными данными. На рис. 4, а приведены результаты моделирования колебательной системы УЗ излучателя резонансного типа с учетом зоны контакта толкателя с поверхностью в сравнении

с экспериментальными данными при работе УЗ излучателя резонансного типа в режиме КЗ из источника [3]. Результаты моделирования согласуются с полученными экспериментальными данными, погрешность составляет не более 15 %. Резонанс системы зафиксирован на 25,5 кГц.

На экспериментальной характеристике, в случае нагрузки в виде трех слоев ПММА, появляется увеличение сигнала ускорения на частоте 13 кГц. Это можно отнести к ошибкам обработки сигнала, так как на этой частоте форма сигнала не синусоидальная (полное преобразование невозможно). На частоте основного резонанса 25,5 кГц сигнал ускорения близок к синусоидальному виду, и в этом случае можно говорить о полном преобразовании энергии.

Анализ результатов моделирования АЧХ интенсивности излучения на границе каждого слоя ПММА, которые приведены на рис. 5, показал, что в рассматриваемых системах присутствуют высокочастотные моды, которые по энергетике могут существенно превышать первые по частоте резонансы. То есть для существенного увеличения коэффициента преобразования энергии необходимо использовать соответ-

ствующие источники питания и пьезоактюаторы для согласования электрофизической, механической и акустической частей колебательной системы.

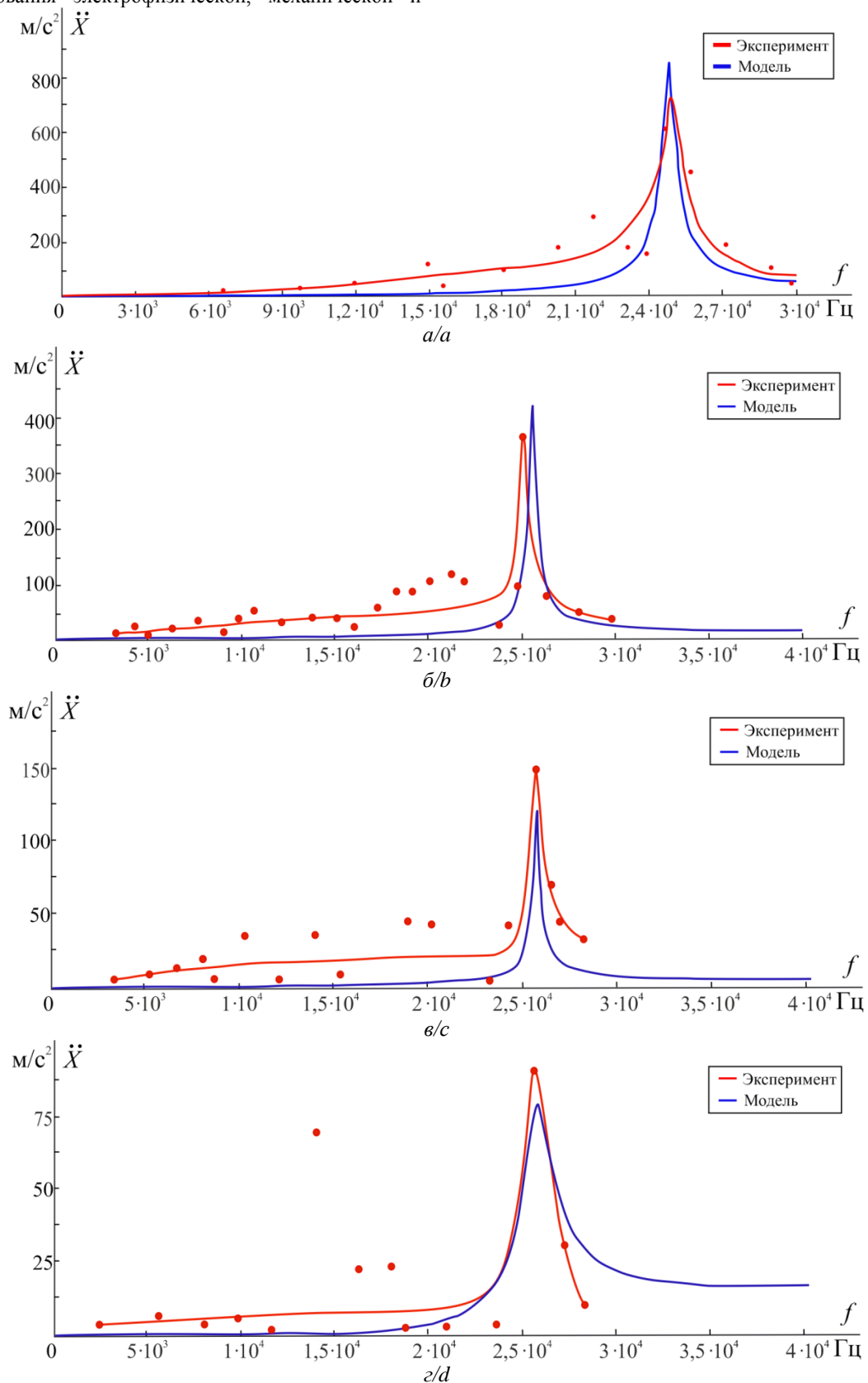


Рис. 4. АЧХ ускорения УЗ излучателя резонансного типа, сравнение данных расчета и эксперимента для случая: а) колебательная система УЗ излучателя с учетом зоны контакта толкателя УЗ излучателя с поверхностью слоя; б) один слой; в) два слоя; г) три слоя

Fig. 4. Amplitude-frequency characteristics of acceleration of ultrasonic resonant emitter, comparison of simulation and experiment data: a) one layer, zone of contact between the ultrasonic emitter pusher and the layer surface; b) one layer; c) two layers; d) three layers

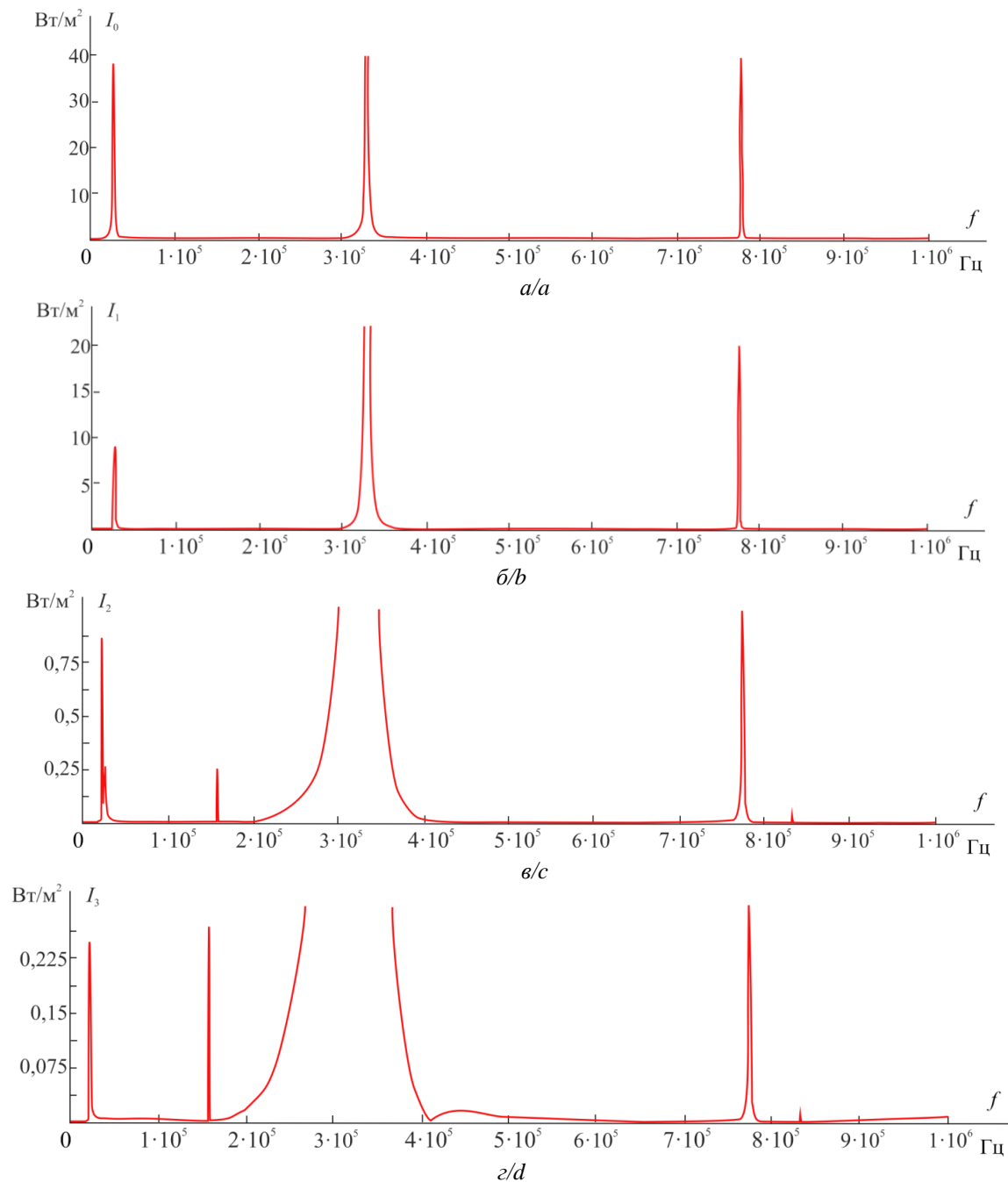


Рис. 5. АЧХ интенсивности излучения УЗ излучателя резонансного типа для случая: а) зона контакта толкателя УЗ излучателя с поверхностью слоя; б) один слой; в) два слоя; г) три слоя

Fig. 5. Amplitude-frequency characteristics of radiation intensity of ultrasonic emitter: a) zone of contact between the ultrasonic emitter pusher and the layer surface; b) one layer; c) two layers; d) three layers

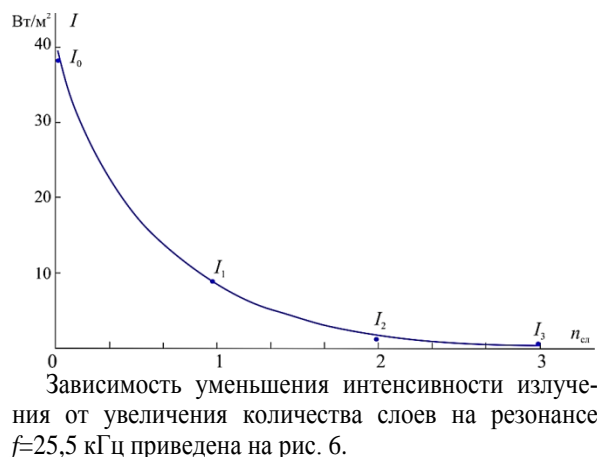


Рис. 6. Зависимость уменьшения интенсивности излучения от увеличения количества слоев при резонансе $f=25,5$ кГц

Fig. 6. Dependence of the decrease in radiation intensity on the increase in the number of layers at resonance $f=25,5$ kHz

Заключение

Для определения уровня акустической энергии в каждом слое многослойной системы в работе предложена математическая модель распространения ультразвукового излучения в многослойной системе, учитывающая конструкцию ультразвукового излучателя резонансного типа, интерференционную картину поля и поглощение излучения в слоях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Математическое моделирование процесса ультразвуковой подготовки высоковязкой нефти к транспорту / А.В. Азин, Е.П. Богданов, С.А. Пономарев, Н.Н. Марицкий, С.В. Рикконен // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 4. – С. 114–122.
2. Лоскутова Ю.В., Юдина Н.В. Влияние условий низкочастотного акустического воздействия на стабильность водонефтяных эмульсий нефти Игнялинского месторождения // Химия в интересах устойчивого развития. – 2020. – Т. 28. – № 3. – С. 266–272. DOI: 10.15372/KhUR2020228.
3. Математическое моделирование ультразвукового излучателя резонансного типа для подготовки высоковязкой нефти к транспорту / А.В. Азин, Е.П. Богданов, С.А. Пономарев, Н.Н. Марицкий, С.В. Рикконен // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 11. – С. 161–169.
4. Intensification of the processes of preparation of drilling and cement mortars using vibration jet activation methods / S.V. Rikkonen, M.A. Dmitrieva, V.N. Leitsin, S.V. Ponomarev, A.V. Azin // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. – 2020. – V. 911. – № 012001. DOI: 10.1088/1757-899X/911/1/012001.
5. Способ виброструйной гидродинамической технологии сохранения текучести углеводородных топлив и нефтепродуктов в условиях низких температур / А.В. Азин, Е.П. Богданов, С.В. Пономарев, С.В. Рикконен // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 4. – С. 158–177.
6. Определение погонных электротехнических параметров нефтепогружного кабеля / А.С. Глазырин, Ю.Н. Исаев, С.Н. Кладиев, А.П. Леонов, И.В. Раков, С.В. Колесников, С.В. Ланграф, А.А. Филипас, В.А. Копырин, Р.Н. Хамитов,

Разработанная математическая модель позволяет проектировать конструкцию акустической системы: общую конструкцию системы, конструкцию излучателя, материалы элементов конструкции, размеры слоев, частоту и амплитуду воздействий звукового излучения на конкретный слой, мощность и частотный диапазон УЗ излучения.

Анализ результатов моделирования показал, что основной характер амплитудно-частотных характеристик рассмотренных случаев согласуется с амплитудно-частотными характеристиками ускорения ультразвукового излучателя резонансного типа при работе в режиме короткого замыкания. Амплитудно-частотные характеристики интенсивности излучения показывают, что в системе присутствуют высокочастотные моды, которые по энергетике могут существенно превышать первый по частоте резонанс. Имея соответствующие источники питания и пьезоактюаторы, можно согласовать электрофизическую, механическую и акустическую части колебательной системы для существенного увеличения коэффициента преобразования энергии излучения.

Экспериментальные данные по амплитудно-частотным характеристикам ускорения ультразвукового излучателя резонансного типа качественно подобны, имеют главный резонанс в районе 25,5 кГц и уменьшение амплитуды ускорения с ростом числа слоев ПММА. Результаты моделирования согласуются с полученными экспериментальными данными, погрешность не превышает 15 %.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 0721-2020-0036).

- В.З. Ковалев, А.В. Лавринович // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 6. – С. 186–197.
7. Резонансные колебания с предельной амплитудой в вибрационном электромагнитном активаторе / А.Н. Гаврилин, Е.В. Боловин, А.С. Глазырин, С.Н. Кладиев, В.И. Полищук // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 1. – С. 201–213.
8. Гусев В.А., Руденко О.В. Поля радиационных сил и акустические течения в жидком слое на твердом полупространстве // Акустический журнал. – 2019. – Т. 65. – № 2. – С. 166–181.
9. Guz A.N., Bagno A.M. Effect of prestresses on the dispersion of Lamb waves in a system consisting of a viscous liquid layer and a compressible elastic layer // International applied mechanics. – 2018. – V. 54 (3). – P. 249–258.
10. Huang L., Liang J., Wu C. A three-dimensional indirect boundary integral equation method for modeling elastic wave scattering in a layered half-space // Int. J. Solids Structures. – 2019. – V. 169. – P. 81–94.
11. Дьелесан Э., Руайе Д. Упругие волны в твердых телах. Применение для обработки сигналов / Пер. с франц. Под ред. В.В. Леманова. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1982. – 424 с.
12. Создание эталонной плоской волны ультразвуковой волны в жидкости с помощью плоского пьезоэлектрического преобразователя большого волнового размера / А.А. Крохмаль, Д.А. Николаев, С.А. Цысарь, О.А. Сапожников // Акустический журнал. – 2020. – Т. 66. – № 5. – С. 475–488.
13. Исаев А.Е., Айвазян Ю.М., Поликарпов А.М. Проблемы исследования акустических свойств материалов методами ближнего поля // Альманах современной метрологии. – 2020. – № 1. – С. 163–196.
14. Зайцев В.В., Кузнецова И.Е. Акустические волны в тонких пьезоэлектрических пластинах. – М.: Радиотехника, 2018. – 240 с.
15. Исакович М.А. Общая акустика. – М.: Наука, 1973. – 489 с.

16. Thin film flexible/bendable acoustic wave devices: evolution, hybridization and decoupling of multiple acoustic wave modes / R. Tao, W.B. Wang, J.T. Luo, S.A. Hasan, H. Torun, P. Canyelles-Pericas, J. Zhou, W.P. Xuan, M.D. Cooke, D. Gibson, Q. Wu, W.P. Ng, J.K. Luo, Y.Q. Fu // *Surface & Coatings Technology*. – 2019. – V. 357. – P. 587–594.
 17. Guiding and splitting Lamb waves in coupled-resonator elastic waveguides / Y.-F. Wang, T.-T. Wang, J.-P. Liu, Y.-S. Wang, V. Laude // *Composite Structures*. – 2018. – V. 206. – P. 588–593.
 18. Анисимкин В.И., Воронова Н.В. Особенности генерации нормальных акустических волн высших порядков в тонких пьезоэлектрических пластинах // *Акустический журнал*. – 2020. – Т. 66. – № 1. – С. 3–7.
 19. Research on the transmission characteristics of air-coupled ultrasound in double-layered bonded structures / X.-G. Wang, W.-L. Wu, Z.-C. Huang, J.-J. Chang, N.-X. Wu // *Materials*. – 2018. – V. 11. – № 310. DOI: 10.3390/ma11020310.
 20. Falleta S., Monegato G., Scuderi L. On the discretization and application of two space-time boundary integral equations for 3D wave propagation problems in unbounded domains // *Applied Numerical Mathematics*. – 2018. – V. 124. – P. 22–43.
 21. Gong Jing. Study on deacidification process of waste internal combustion engine oil under the action of ultrasound // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ.* – 2020. – V. 467. – № 012046. – 7 p. DOI: 10.1088/1755-1315/467/1/012046.
 22. Xu Y., Langbauer C., Hofstaetter H. The application of ultrasonic technology for cleaning oil contaminated sand // *SPE Asia Pacific Health, Safety, Security, Environment and Social Responsibility Conference*. – Kuala Lumpur, 2017. – 12 p.
- Поступила: 21.11.2022 г.*
Прошла рецензирование: 15.02.2023 г.

Информация об авторах

Азин А.В., кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета.

Богданов Е.П., кандидат технических наук, доцент Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Рикконен С.В., кандидат технических наук, доцент, инженер-исследователь Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета.

UDC 534.22

SIMULATION OF ACOUSTIC ENERGY TRANSFER THROUGH A MULTILAYER SYSTEM FOR CHANGING THE RHEOLOGICAL PROPERTIES OF HYDROCARBONS

Anton V. Azin¹,
antonazin@niipmm.tsu.ru

Eugene P. Bogdanov²,
epbogdanov@mail.ru

Sergey V. Rikkonen¹,
rikk2@yandex.ru

¹ National Research Tomsk State University,
36, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

² National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

Relevance of the research is caused by the need to determine the acoustic energy level of ultrasonic exposure propagation in a multilayer system. This is required to develop the engineering project of ultrasonic devices which would modify the hydrocarbon fuel rheological properties. This, in its turn, could further their application in energy complex facilities in the Arctic and Antarctic environments.

Aim: to develop a mathematical model for ultrasonic radiation propagation in a multilayer system with the determination of the energy at each resonance. Such a model would take into account the design-type of the ultrasound resonant emitter.

Object: design-type of the ultrasound resonant emitter, multilayer system and physical model system: «ultrasonic emitter – multilayer system».

Methods: mathematical modeling of ultrasonic radiation propagation within a multilayer system, considering the following impact factors: design-type of the ultrasound resonant emitter, operating mode, number of layers and material mechanical properties of the multilayer system. Experiments were based on the physical model system: «ultrasonic emitter – multilayer system». Experimental data verification proved the effectiveness of the mathematical model.

Results. This mathematical model enables to determine and calculate the energy and frequency characteristics of acoustic radiation in each layer within the multilayer system itself. Ultrasonic resonant emitter operating experiments under one plexiglass-layer, two plexiglass-layer and three-plexiglass layer loads have been carried out. Estimated data are in good agreement with experiments, whereas, discrepancy does not exceed 15 %.

Conclusion. Proposed and developed mathematical model enables the ultrasound resonant emitter-type to be designed, according to required power source capacity and frequency range. In this case, it could be applied for hydrocarbon fuel laboratory research.

Key words:

emitter, radiation energy, radiation intensity, standing waves, reflected waves, interference pattern, frequency characteristics, multilayer system.

The work was carried out within the framework of the State mission of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme 0721-2020-0036).

REFERENCES

1. Azin A.V., Bogdanov E.P., Ponomarev S.A., Maritsky N.N., Rikkonen S.V. Mathematical modelling of high-viscous oil ultrasonic preparation for transport. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 4, pp. 114–122. In Rus.
2. Loskutova Yu.V., Yudina N.V. Effect of the conditions of low-frequency acoustic treatment on the stability of oil-water emulsions of oil from the Ignalinskoye deposit. *Chemistry for Sustainable Development*, 2020, vol. 28, no. 3, pp. 266–272. In Rus. DOI: 10.15372/KhUR2020228.
3. Azin A.V., Bogdanov E.P., Ponomarev S.A., Maritsky N.N., Rikkonen S.V. Mathematical modelling of high-viscous oil ultrasonic preparation for transport. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 11, pp. 161–169. In Rus.
4. Rikkonen S.V., Dmitrieva M.A., Leitsin V.N., Ponomarev S.V., Azin A.V. Intensification of the processes of preparation of drilling and cement mortars using vibration jet activation methods. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 911, no. 012001. DOI: 10.1088/1757-899X/911/1/012001.
5. Azin A.V., Bogdanov E.P., Ponomarev S.V., Rikkonen S.V. Method of vibro-jet hydrodynamic technology to retain the fluidity of hydrocarbon fuels and petroleum products at low temperatures. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 4, pp. 41–48. In Rus.
6. Glazyrin A.S., Langraf S.V., Isaev Y.N., Filipas A.A., Kladiev S.N., Kopyrin V.A., Leonov A.P., Khamitov R.N., Rakov I.V., Kovalev V.Z., Kolesnikov S.V., Lavrinovich A.V. Determination of running electrical characteristics of oil submersible cable. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 6, pp. 186–197. In Rus.
7. Gavrilin A.N., Bolovin E.V., Glazyrin A.S., Kladiev S.N., Polishchuk V.I. Resonant oscillations with a limiting amplitude in a vibration electromagnetic activator. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 1, pp. 201–213. In Rus.
8. Gusev V.A., Rudenko O.V. Radiation force fields and acoustic flows in a liquid layer on a solid half-space. *Acoustical physics*, 2019, vol. 65, no. 2, pp. 166–181. In Rus.
9. Guz A.N., Bagno A.M. Effect of prestresses on the dispersion of Lamb waves in a system consisting of a viscous liquid layer and a compressible elastic layer. *International applied mechanics*, 2018, vol. 54 (3), pp. 249–258.
10. Huang L., Liang J., Wu C. A three-dimensional indirect boundary integral equation method for modeling elastic wave scattering in a layered half-space. *International Journal of Solids and Structures*, 2019, vol. 169, pp. 81–94.

11. Dieulesaint E., Royer D. *Uprugie volny v tverdykh telakh. Primenenie dlya obrabotki signalov* [Elastic waves in solids. Application for signal processing]. Moscow, Nauka Publ., 1982. 424 p.
12. Krokhamal A.A., Nikolaev D.A., Tsysar S.A., Sapozhnikov O.A. Creation of a reference plane wave of an ultrasonic wave in a liquid using a flat piezoelectric emitter of large wave size. *Acoustical physics*, 2020, vol. 66, no. 5, pp. 475–488.
13. Isaev A.E., Ayvazyan Yu.M., Polikarpov A.M. Problemy issledovaniya akusticheskikh svoystv materialov metodami blizhnego polya [Problems of studying the acoustic properties of materials by near-field methods]. *Almanac of modern metrology*, 2020, no. 1, pp. 163–196.
14. Zaytsev V.V., Kuznetsova I.E. *Akusticheskie volny v tonkikh piezoelektricheskikh plastinakh* [Acoustic waves in thin piezoelectric plates]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2018. 240 p.
15. Isakov M.A. *Obshchaya akustika* [General acoustics]. Moscow, Nauka Publ., 1973. 489 p.
16. Tao R., Wang W.B., Luo J.T., Hasan S.A., Torun H., Canyelles-Pericas P., Zhou J., Xuan W.P., Cooke M.D., Gibson D., Wu Q., Ng W.P., Luo J.K., Fu Y.Q. Thin film flexible/bendable acoustic wave devices: evolution, hybridization and decoupling of multiple acoustic wave modes. *Surface & Coatings Technology*, 2019, vol. 357, pp. 587–594.
17. Wang Y.-F., Wang T.-T., Liu J.-P., Wang Y.-S., Laude V. Guiding and splitting Lamb waves in coupled-resonator elastic waveguides. *Composite Structures*, 2018, vol. 206, pp. 588–593.
18. Anisimkin V.I., Voronova N.V. Features of the generation of higher-order normal acoustic waves in thin piezoelectric plates. *Acoustical physics*, 2020, vol. 66, no. 1, pp. 3–7.
19. Wang X.-G., Wu W.-L., Huang Z.-C., Chang J.-J., Wu N.-X. Research on the transmission characteristics of air-coupled ultrasound in double-layered bonded structures. *Materials*, 2018, vol. 11, no. 310. DOI: 10.3390/ma11020310.
20. Falleta S., Monegato G., Scuderi L. On the discretization and application of two space-time boundary integral equations for 3D wave propagation problems in unbounded domains. *Applied Numerical Mathematics*, 2018, vol. 124, pp. 22–43.
21. Gong Jing. Study on deacidification process of waste internal combustion engine oil under the action of ultrasound. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 2020, vol. 467, no. 012046, 7 p. DOI: 10.1088/1755-1315/467/1/012046.
22. Xu Y., Langbauer C., Hofstaetter H. The application of ultrasonic technology for cleaning oil contaminated sand. *SPE Asia Pacific Health, Safety, Security, Environment and Social Responsibility Conference*. Kuala Lumpur, 2017. 12 p.

Received: 21 November 2022.

Reviewed: 15 February 2023.

Information about the authors

Anton V. Azin, Cand. Sc., senior researcher, National Research Tomsk State University.

Eugene P. Bogdanov, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Sergey V. Rikonen, Cand. Sc., research engineer, National Research Tomsk State University.