

УДК 534.22

НАСТРОЙКА РЕЗОНАНСНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ ПРИ ОДНОСТОРОННЕМ ДОСТУПЕ К ОБЪЕКТУ

Азин Антон Владимирович¹,
antonazin@mail.ru

Богданов Евгений Петрович²,
ber@tpu.ru

Васильев Александр Викторович¹,
alphatomsk@yandex.ru

Пономарев Сергей Александрович¹,
doc.sergeyponomarev@gmail.com

Пономарев Сергей Васильевич¹,
psv@niipmm.tsu.ru

Рикконен Сергей Владимирович¹,
s.rikkonen@yandex.ru

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

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

Актуальность. Для подготовки высоковязкой нефти к транспорту в практике используется ряд методов: термический, химический и метод физических воздействий. Ультразвуковое воздействие на углеводородное сырье является одним из физических методов. Необходима разработка эффективной методики настройки ультразвукового излучателя для максимальной передачи энергии в многослойную технологическую среду.

Цель: изучение резонансных режимов работы ультразвукового излучателя в многослойной системе при одностороннем доступе к объекту с упрощением конструкции ультразвукового излучателя резонансного типа.

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

Методы: математическое моделирование линейной колебательной системы с целью определения влияния свойств колебательной системы и технологических факторов на форму колебаний виброускорения и на амплитудно-частотные характеристики системы; экспериментальные исследования на основе физической модели системы «ультразвуковой излучатель – многослойная система».

Результаты. Выявлена физическая особенность работы колебательной системы, состоящая в том, что на резонансе форма колебаний сигналов силы многослойного пьезоактюатора и сигналов виброускорения имеют чисто гармонический характер. Этот эффект распространяется на работу ультразвукового излучателя резонансного типа в режиме короткого замыкания на многослойную систему. Проведены экспериментальные исследования работы ультразвукового излучателя резонансного типа в режиме короткого замыкания и при нагрузке в виде одного и двух слоев полиметилметакрилата. Получено, что амплитудно-частотная характеристика силы многослойного пьезоактюатора и виброускорения подобны друг другу. На основе анализа теоретических и экспериментальных данных разработана методика настройки резонансных режимов работы ультразвукового излучателя при одностороннем доступе к объекту, которая позволяет упростить и удешевить конструкцию излучателя. Методика настройки колебательных систем применима для лабораторных и промышленных установок.

Выводы. Анализ результатов проведенных исследований показал, что на практике в качестве критериев при определении и настройке резонанса колебательной системы можно использовать гармоническую форму сигналов ускорения и силы, а также амплитуду силы многослойного пьезоактюатора. Колебательную систему ультразвукового излучателя резонансного типа можно настраивать на резонанс по форме и амплитуде сигнала датчика силы многослойного пьезоактюатора, причем датчик силы расположен последовательно с многослойным пьезоактюатором и не требует дополнительных конструктивных элементов для его крепления. Конструкция ультразвукового излучателя значительно упрощается из-за отсутствия датчика виброускорения. Методика настройки в резонанс колебательной системы с использованием только датчика силы распространяется и при работе ультразвукового излучателя резонансного типа на многослойную механическую систему. Разработанную конструкцию и методику настройки колебательной системы ультразвукового излучателя резонансного типа удобно использовать при воздействии на технологические жидкости через стенки резервуаров и емкостей хранения.

Ключевые слова:

Ультразвуковой излучатель, энергия излучения, резонанс, датчик силы, датчик ускорения, частотные характеристики, многослойная система.

Введение

Особенность надмолекулярной структуры углеводородных жидкостей вызывает ряд проблем, возникающих в процессе добычи, перекачки и переработки данного сырья [1]. Для указанных технологических процессов это выражается в изменении реологических свойств: высокой вязкости, высокой (положительной) температуре застывания и отложения парафина на оборудовании и трубопроводе. Для подготовки высоковязкой нефти к транспорту в практике используется ряд методов: 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 [2–5]. Ультразвуковое воздействие на углеводородное сырье является одним из физических методов. В работах [1–12] показано влияние ультразвука на реологические свойства углеводородной среды.

Ультразвуковое излучение, проникая через стенки разнообразных конструкций емкостей хранения технологических жидкостей, может совершать механическую работу над средой (сварку, полимеризацию, плавление, изменение реологических свойств углеводородных сред: вязкости, температуры кипения, температуры застывания, времени тиксотропии) в определенном (замкнутом) пространстве на расстоянии от излучателя [1–5, 10–12].

Максимальная энергия, поглощаемая в среде, образуется на резонансе, режиме работы, при котором частота возбуждения совпадает с собственной частотой колебательной системы (КС). Самый распространенный на практике метод настройки в резонанс производится по максимальному сигналу акселерометра. На практике часто необходимо настраивать КС при одностороннем доступе к объекту, так как расположение датчиков ускорения (акселерометров) в агрессивной среде вызывает определенные трудности. Расположение датчика ускорения в конструкции ультразвукового (УЗ) излучателя усложняет и удорожает его изготовление. При этом датчик ускорения должен находиться на оси симметрии конструкции УЗ излучателя. Технологические неточности производства и настройки генерируют высшие гармоники колебаний, искажающие работу КС.

Целью работы является изучение резонансных режимов работы УЗ излучателя в многослойной системе при одностороннем доступе к объекту.

Моделью идеальной КС в теории колебаний является динамическая система, схема которой приведена на рис. 1. В зависимости от характера идеализации колебательной системы ей могут соответствовать различные динамические модели. Самая простая механическая колебательная система – это груз, подвешенный на пружине [13].

Можно ожидать, что при идеальной линейной КС с гармонической силой возбуждения форма выходных сигналов датчиков силы и ускорения будет синусоидальной. Для конкретной КС на практике настройка резонансного режима работы (по первой моде) возможна по двум параметрам:

- максимальной амплитуде колебания (наличие акселерометра, датчика виброскорости, датчика вибросмещения);
- нулевой (или близкой к 0) фазе между силой возбуждения и виброскоростью (необходимо наличие датчика виброскорости и датчика силы).

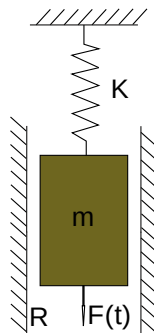


Рис. 1. Простейшая динамическая модель линейной колебательной системы: m – масса груза, кг; K – жесткость пружины (упругий подвес), Н/м; R – коэффициент неупругого сопротивления, кг/с

Fig. 1. Simplest dynamic model of a linear oscillating system: m – load weight, kg; K – spring stiffness (elastic suspension), N/m; R – inelastic resistance coefficient, kg/s

Критерий настройки резонансного режима работы УЗ излучателя резонансного типа по фазо-частотной характеристике (ФЧХ) (по нулевой фазе) возможен при малых значениях диссипации системы.

В отличие от идеальной линейной КС, представленной на рис. 1, УЗ излучатель резонансного типа будет иметь несколько другие амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) и ФЧХ, по сравнению с КС, представленной на рис. 2.

На рис. 3 представлен УЗ излучатель резонансного типа, который выполнен на основе многослойного пьезоактюатора АПМ-2-7 и состоит из: 1 – корпус излучателя; 2 и 6 – центраторы; 3 – многослойный пьезоактюатор АПМ-2-7; 4 – толкатель; 5 – упругость; 7 – датчик силы; 8 – смотровые окна в корпусе излучателя; 9 – стальная щека; 10 – гайка предварительного поджатия; 11 – стопорная гайка.

Конструкция УЗ излучателя резонансного типа является сложной колебательной системой, состоящей из отдельных масс и упругостей, то есть представляет собой сочетание нескольких колебательных подсистем.

УЗ излучатель резонансного типа состоит из следующих колебательных подсистем:

- подсистема «толкатель–упругость»;
- подсистема «корпус – упругость корпуса»;
- подсистема многослойного пьезоактюатора.

Все эти подсистемы имеют свои резонансы и могут вносить существенный вклад в АЧХ УЗ излучателя резонансного типа и в форму результирующих колебаний.

Кроме того, на результирующую АЧХ УЗ излучателя резонансного типа влияют технологические особенности: допуски при изготовлении элементов конструкции и неточности сборки [7–10].

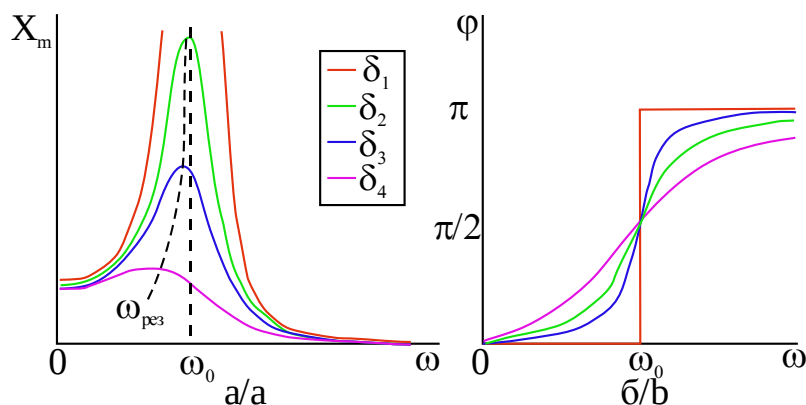


Рис. 2. АЧХ и ФЧХ линейной (идеальной) КС при разных коэффициентах диссипации (при разных потерях): ω_0 – собственная угловая частота КС; $\omega_{рез}$ – резонансная угловая частота КС; X_m – амплитуда виброскорости КС; φ – фаза между силой и виброскоростью. Сила возбуждения имеет синусоидальный характер. Коэффициент затухания КС: $\delta_4 > \delta_3 > \delta_2 > \delta_1$ [13]

Fig. 2. Amplitude frequency and Phase-Frequency characteristics of linear (ideal) oscillation system at different dissipation coefficients (at different losses): ω_0 – own angular frequency of the oscillating system; $\omega_{рез}$ – resonance angular frequency of the oscillating system; X_m – amplitude of the oscillating system vibration acceleration; φ – phase between force and vibration acceleration. The excitation force is pure sinusoidal. Attenuation factor of oscillation system: $\delta_4 > \delta_3 > \delta_2 > \delta_1$ [13]

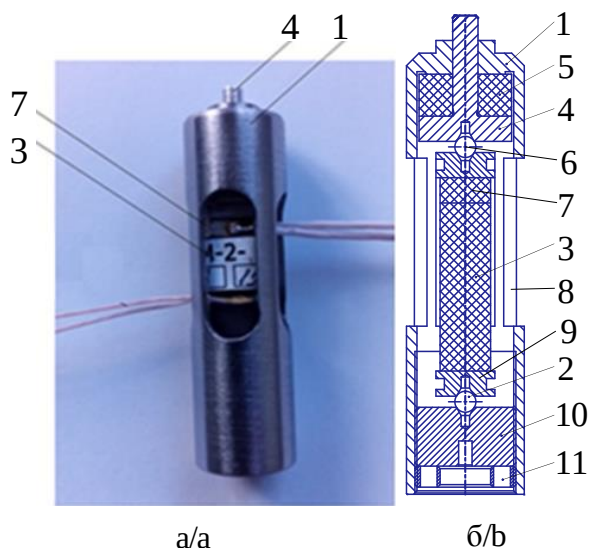


Рис. 3. Ультразвуковой излучатель резонансного типа: а) вариант изготовления; б) структурная схема

Fig. 3. Ultrasonic resonant emitter: a) manufacturing variant; b) structural design

В установившемся режиме работы идеальной КС при синусоидальной силе возбуждения по всей АЧХ форма колебаний подвижных частей КС будет иметь синусоидальный характер. Это обстоятельство служит предпосылкой для проведения расчетов с использованием метода комплексных амплитуд (символический метод расчета КС).

В переходном режиме работы идеальной КС даже действие гармонической силы на КС не гарантирует гармонический отклик механической КС в виде виброперемещения, виброскорости, виброускорения, так как во время переходного процесса одновременно присутствуют и собственные частоты КС, и частоты вынужденных колебаний. Только при совпадении этих частот наступает основной резонанс КС [2–4, 7–10, 13, 14].

При гармоническом воздействии на линейную КС при пуске возникают сложные колебания, состоящие из двух частей: колебания с частотой возмущения f_b и колебания с частотой собственных колебаний $f_{соб}$. Первые колебания называют вынужденными, вторые – свободными (рис. 4). В данном случае игнорируются неупругие сопротивления [13].

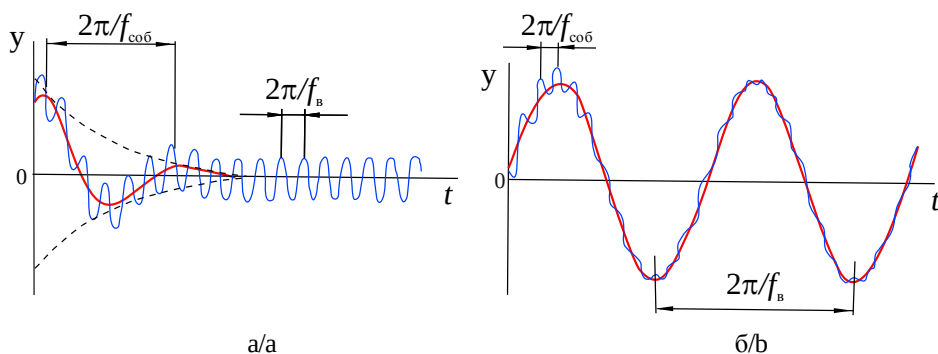


Рис. 4. Процесс сложения двух колебаний с различными частотами: а) $f_b > f_{соб}$; б) $f_b < f_{соб}$ [13]

Fig. 4. Adding two oscillations with different frequencies: а) $f_b > f_{соб}$; б) $f_b < f_{соб}$ [13]

Эта картина справедлива для идеальной линейной КС, после затухания переходного процесса система работает в устойчивом режиме. Однако при наличии паразитных гармоник силы возбуждения переходного процесса не затухают, и КС находится в постоянном квази-переходном режиме работы, который искажает АЧХ. Наличие ряда колебательных подсистем УЗ излучателя и технологических неточностей (некачественная сборка) позволяет считать, что даже при гармоническом напряжении питания многослойного пьезоактюатора в установившемся режиме колебания подвижных элементов конструкции УЗ излучателя будут негармоническими.

Поведение КС при несинусоидальном возбуждении (наличие колебательных подсистем, технологических неточностей производства и сборки) можно проиллюстрировать при периодическом импульсном воздействии (рис. 5). При совпадении частот или их кратности ($f_{\text{соб}} = n \cdot f_{\text{в}}$, $n = 1/4, 1/2, 1$) возникает резонанс [1, 5, 7–17].

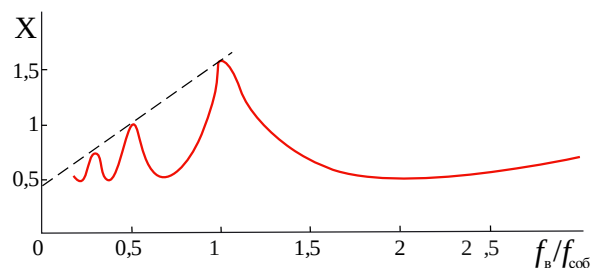


Рис. 5. АЧХ КС с учетом потерь при периодическом импульсном воздействии [13]

Fig. 5. Amplitude frequency characteristic of the oscillating system taking into account losses at periodic pulse action [13]

Математическое моделирование

При несинусоидальных формах возмущающих воздействий каждая кратная гармоника будет иметь свой пик амплитуды в частотной характеристике, убывающей по линейному закону (рис. 5) [13]. Наличие подобной АЧХ УЗ излучателя резонансного типа можно проиллюстрировать моделированием линейной КС при периодическом импульсном воздействии (типа меандр, рис. 6, б), используя математическую модель распространения ультразвукового излучения в многослойной системе [7].

Моделирование работы линейной акустической системы УЗ излучателя проводилось численным методом в пакете прикладных программ Mathcad [7–10].

Математическая модель распространения ультразвукового излучения в многослойной системе позволяет показывать формы колебаний КС при разных частотах. Анализ результатов моделирования показал, что квазигармонические колебания КС появляются только в районе резонансных частот, чистая синусоида вибро-смещения появляется только на резонансе (рис. 6). На резонансе гармонические колебания КС УЗ излучателя резонансного типа показывают, что конструкция колебательной системы работает как «единое целое», то есть все подвижные элементы конструкции движутся в одной фазе. Поведение КС при несинусоидальном возбуждении (наличие подсистем, технологических неточностей) на резонансе очень похоже на поведение линейной КС с гармоническим возбуждением – система «фильтрует» высокие частоты, оставляя первую гармонику. При периодическом импульсном воздействии на АЧХ проявляются дополнительные максимумы амплитуд, что соответствует [13].

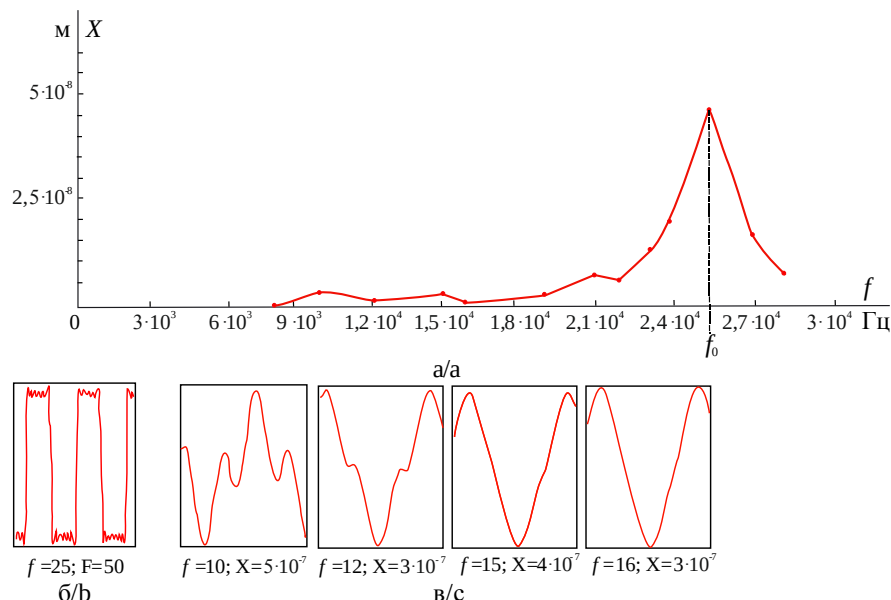


Рис. 6. Результаты моделирования КС УЗ излучателя резонансного типа: а) АЧХ КС установившегося режима при периодическом импульсном воздействии (типа меандр); б) график периодического импульсного воздействия: f в кГц, F в Н; в) формы временных зависимостей вибро-смещения при разных частотах воздействия (в соответствии с АЧХ): f в кГц, X в м

Fig. 6. Results of modelling ultrasonic resonance type emitter oscillating system: а) amplitude frequency of the fixed-mode oscillation system at periodic pulse (meander type); б) periodic impulse schedule: f in kHz, F in N; в) forms of temporal vibration dependencies at different exposure frequencies (according to amplitude frequency characteristic): f in kHz, X in m

Экспериментальные исследования

Акустическая энергия УЗ излучателя должна производить определенную работу при воздействии на разнообразные технологические жидкости – углеводородное топливо, нефть, водонефтяные эмульсии, буровой раствор, цементный раствор, полимерные жидкости. Технологические жидкости и топлива хранятся в резервуарах или в топливных баках, через стенку которых акустическая энергия должна пройти и воздействовать на технологическую жидкость [1, 7–10, 13, 17–21]. Максимальная энергия в рабочей среде будет на резонансе КС. Но настройка КС на резонанс в данном случае затруднена при расположении датчика ускорения в рабочей (агрессивной) среде.

Сопоставление АЧХ сигнала силы и АЧХ сигнала виброускорения при работе на многослойную систему в одном эксперименте позволит синтезировать

способ настройки в резонанс КС с односторонним доступом к объекту [1, 5–12, 14–18].

Экспериментальные исследования целесообразно начать со снятия АЧХ силы и ускорения при работе КС УЗ излучателя резонансного типа в режиме короткого замыкания (КЗ) (без нагрузки, при максимальных значениях ускорения).

На рис. 7, а показана схема проведения эксперимента. Сигналы с акселерометра AP10 обрабатывались на предварительном усилителе ZET 440 фирмы ZETLAB. Датчик силы представляет собой предварительно прокалиброванный пьезоактюатор (50 слоев).

На осциллографе GDS-72104E фирмы GW Instek снимаются сигналы: U – напряжения на многослойном пьезоактюаторе; F – пропорциональной силы многослойного пьезоактюатора; I – ток многослойного пьезоактюатора; $\ddot{X}$ – ускорение толкателя. На рис. 7, б приведена осциллограмма процесса на частоте 20 кГц.

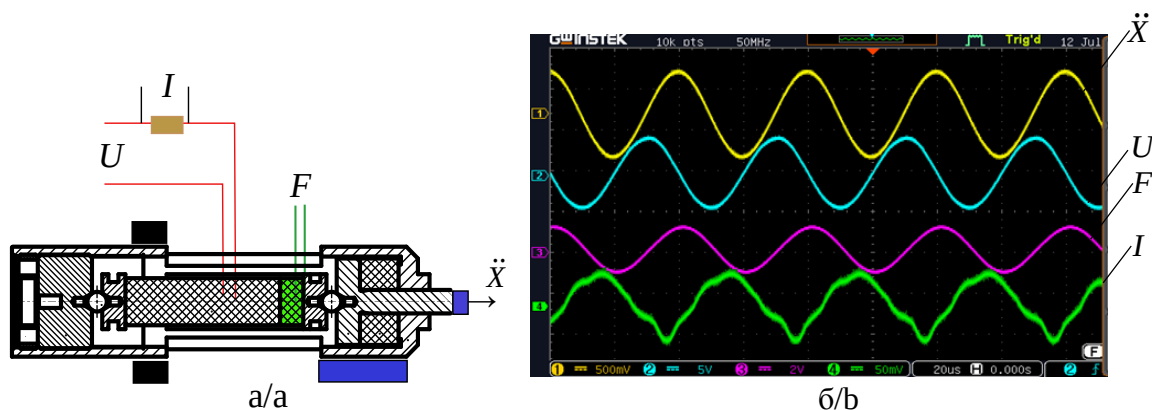


Рис. 7. Эксперимент: а) схема снятия экспериментальной АЧХ УЗ излучателя при работе на холостом ходу; б) осциллограммы сигналов измерительной системы

Fig. 7. Experiment: a) experimental amplitude-frequency characteristics ultrasonic emitter while idling; b) signal oscillograms of the measuring system

На рис. 8 представлены АЧХ силы многослойного пьезоактюатора и АЧХ ускорения УЗ излучателя резонансного типа. Сигнал ускорения получен с акселерометра, расположенного на торце толкателя. На осциллограммах данного рисунка показаны сигналы напряжения питания, ускорения толкателя и силы многослойного пьезоактюатора. Заштрихованная часть АЧХ ускорения показывает наличие гармонических колебаний этих трех сигналов на частотах, близких к резонансу, $f_p=25,5$ кГц. Вторая часть АЧХ, имеющая гармонические колебания этих трех сигналов, расположена на частотах близких к 22 кГц, но амплитуда ускорения значительно ниже, чем на основном резонансе, и не представляет интереса (рис. 8).

Наличие гармонических сигналов на резонансе позволяет использовать формулы определения полной механической мощности КС в представлении ее как линейной системы.

Полная механическая мощность КС на резонансе S определяется из формулы:

$$S = \frac{F_m \cdot \dot{X}_m}{2} = \frac{F_m \cdot \ddot{X}_m}{4\pi f}.$$

АЧХ полной механической мощности показывает, что мощность имеет максимум на частоте 25,5 кГц и это соответствует резонансному режиму по ускорению $\ddot{X}$ и по силе многослойного пьезоактюатора F_m (рис. 9).

Из данного эксперимента видно, что настройка на резонансный режим КС УЗ излучателя резонансного типа вполне возможна только по датчику силы, который расположен последовательно с многослойным пьезоактюатором и не требует дополнительных конструктивных элементов для фиксации в корпусе УЗ излучателя резонансного типа.

Далее представлены результаты исследования работы УЗ излучателя резонансного типа с нагрузкой в виде одного слоя полиметилметакрилата (ПММА) толщиной $d=1$ мм.

Наличие в конструкции УЗ излучателя резонансного типа датчика силы многослойного пьезоактюатора и акселерометра на обратной стороне слоя ПММА позволяет получить АЧХ силы и ускорения и сравнить их на предмет совпадения максимальных амплитуд сигналов для определения функционального дублирования датчика ускорения на датчик силы при настройке КС на резонанс (рис. 10).

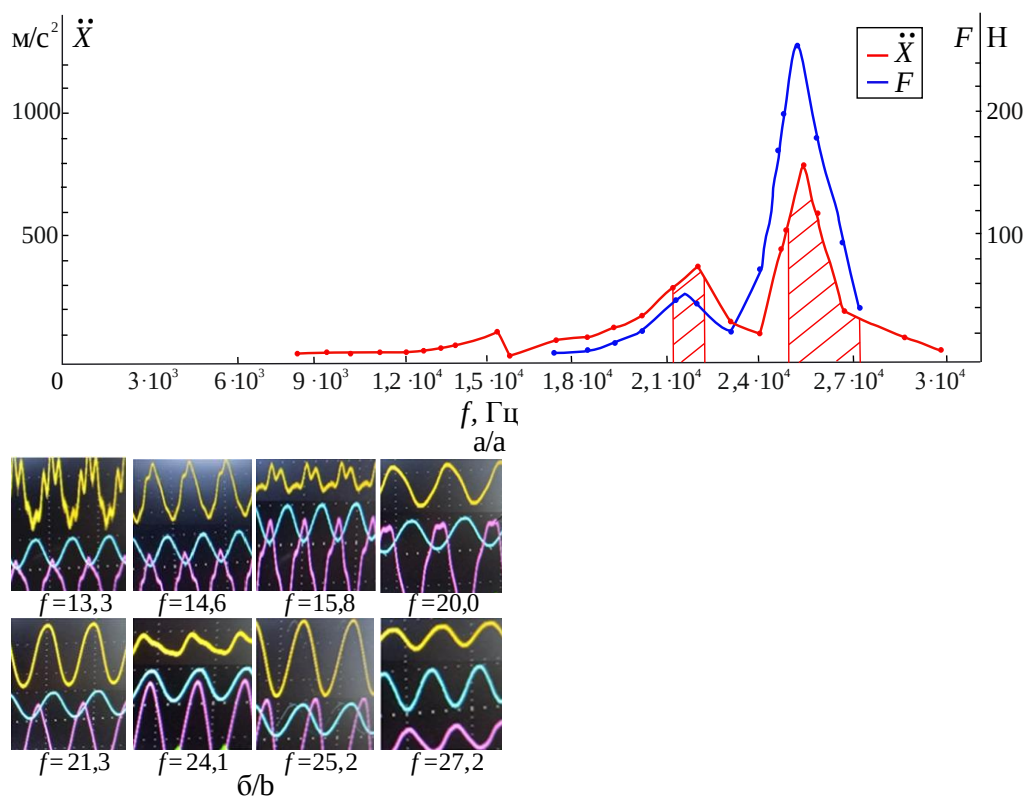


Рис. 8. Результаты экспериментальных исследований работы УЗ излучателя резонансного типа в режиме КЗ: а) АЧХ сигналов силы многослойного пьезоактюатора и ускорения УЗ излучателя резонансного типа; б) формы временных зависимостей сигналов напряжения, силы и ускорения при разных частотах воздействия (в соответствии с АЧХ), в кГц

Fig. 8. Results of experimental studies of the ultrasonic resonance type emitter operation in the short-circuit mode: a) amplitude frequency of the force of the multilayer PZT-stack and ultrasonic resonance emitter acceleration; b) forms of temporal relationships of voltage, force and acceleration at different frequencies of action (according to the amplitude frequency characteristic), in kHz

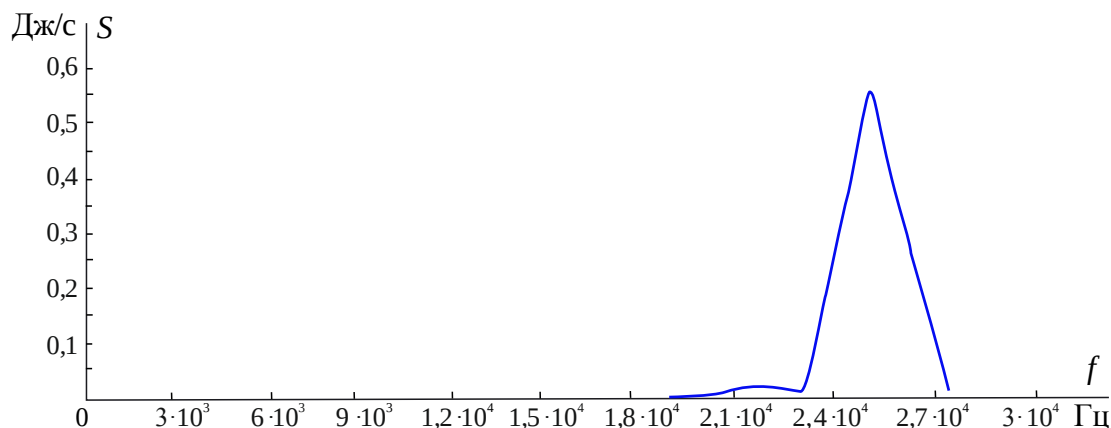


Рис. 9. АЧХ полной мощности УЗ излучателя резонансного типа в режиме КЗ

Fig. 9. Amplitude frequency characteristic of the full power of the ultrasonic resonance type emitter in the short-circuit mode

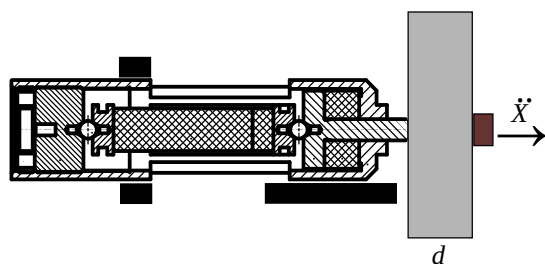


Рис. 10. Схема эксперимента по определению АЧХ УЗ излучателя резонансного типа на стенку из ПММА толщиной $d = 1$ мм

Fig. 10. Experimental scheme for determining the amplitude frequency characteristic of a resonance-type radiator on a wall made of a 1 mm thick polymethyl methacrylate

Данный эксперимент показывает возможность настройки КС на резонансную частоту по сигналу датчика силы. Сигналы силы пьезоактюатора и ускорения качественно похожи по всей АЧХ и имеют максималь-

ное значение амплитуды на одной частоте. Самые гармонические сигналы силы и ускорения наблюдаются в районе резонансной частоты, что позволяет более точно настроить КС на резонанс (рис. 11).

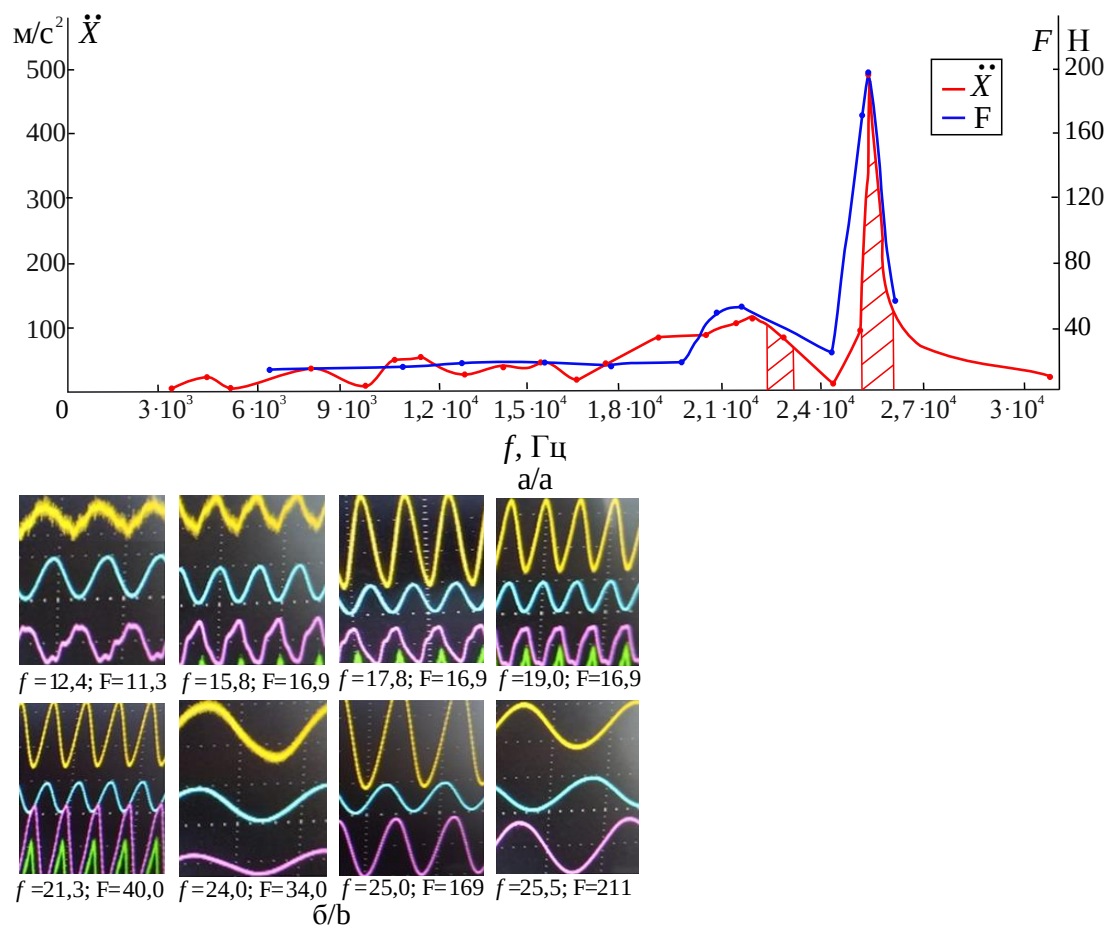


Рис. 11. Результаты экспериментальных исследований работы УЗ излучателя резонансного типа с нагрузкой в виде одного слоя ПММА: а) АЧХ сигнала силы многослойного пьезоактюатора и сигнала ускорения УЗ излучателя резонансного типа; б) формы временных зависимостей сигналов напряжения, силы и ускорения при разных частотах воздействия (в соответствии с АЧХ): f в кГц, F в Н

Fig. 11. Results of experimental studies of a single-layer polymethyl methacrylate resonance type ultrasonic emitter: а) amplitude frequency characteristics of force and acceleration of multilayer PZT-stack of ultrasonic resonance emitter; б) forms of temporal relationships of voltage, force and acceleration at different impact frequencies (according to amplitude frequency characteristic): f in kHz, F in N

Далее представлены результаты исследования работы УЗ излучателя резонансного типа с нагрузкой в виде двух слоев ПММА с толщиной слоя $d=1$ мм каждый. Схема эксперимента приведена на рис. 12.

Данный эксперимент показывает возможность настройки КС на резонансную частоту по сигналу датчика силы. Сигналы силы пьезоактюатора и ускорения качественно похожи по всей АЧХ и имеют максимальное значение амплитуды на близких частотах. Самые гармонические сигналы силы и ускорения наблюдаются в районе резонансной частоты, что позволяет более точно настроить КС на резонанс (рис. 13). В данной работе гармонический состав сигналов ускорения и силы оценивался по математическому сравнению с кривой напряжения питания УЗ излучателя, которое является синусоидальным. Ошибка при таком сравнении не превышает 15 %.

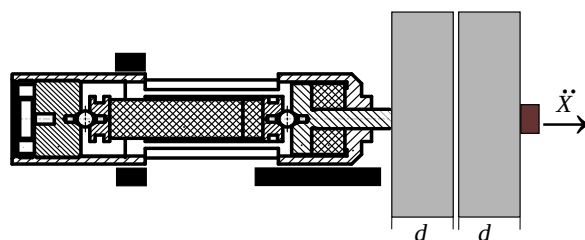


Рис. 12. Схема эксперимента по определению АЧХ УЗ излучателя резонансного типа стенку из двух слоев ПММА толщиной 1 мм

Fig. 12. Experimental scheme for determining the amplitude frequency characteristic of a resonance-type radiator wall consisting of two 1 mm thick layers of polymethyl methacrylate

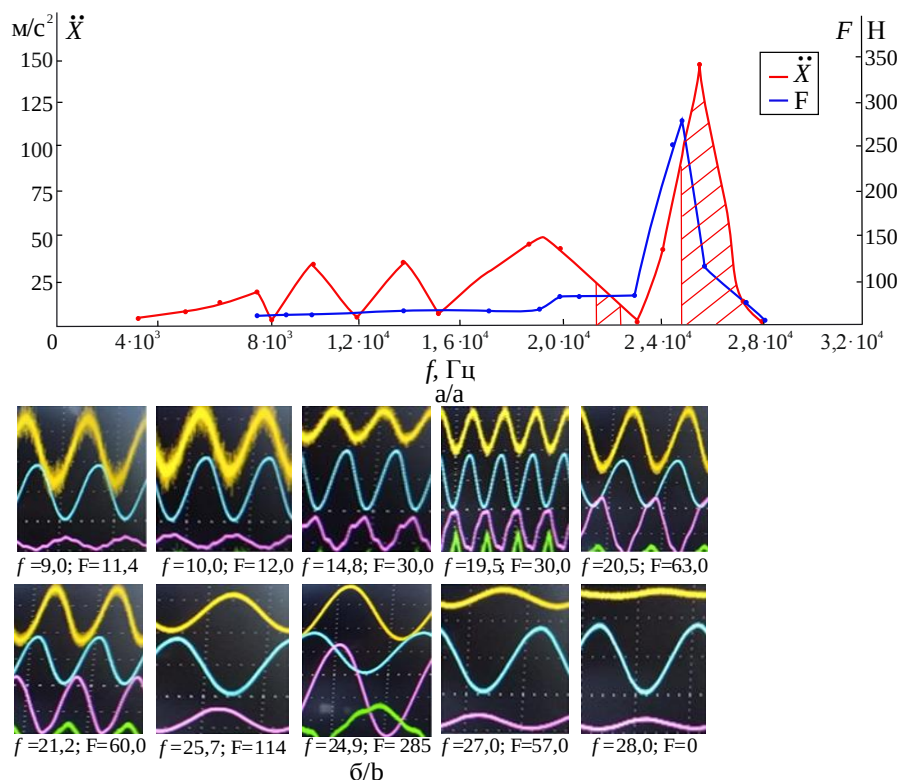


Рис. 13. Результаты экспериментальных исследований работы УЗ излучателя резонансного типа с нагрузкой в виде двух слоев ПММА: а) АЧХ сигнала силы многослойного пьезоактюатора и сигнала ускорения УЗ излучателя резонансного типа; б) формы временных зависимостей сигналов напряжения, силы и ускорения при разных частотах воздействия (в соответствии с АЧХ): f в кГц, F в Н

Fig. 13. Results of experimental studies of the ultrasonic resonance type emitter operation with a load in the form of two layers of polymethyl methacrylate: а) amplitude frequency characteristics of force and acceleration of ultrasonic resonance emitter multilayer PZT-stack; б) forms of temporal relationships of voltage, force and acceleration at different impact frequencies (according to amplitude frequency characteristic): f in kHz, F in N

Результаты проведенных экспериментальных исследований продемонстрировали возможность настройки УЗ излучателя резонансного типа при одностороннем доступе к объекту исследования по датчику силы.

Настройка резонанса через стенку элементов конструкции по сигналу датчика силы многослойного пьезоактюатора позволяет не располагать датчик ускорения внутри емкости или на толкателе УЗ излучателя, что существенно упрощает конструкцию УЗ излучателя резонансного типа.

Заключение

1. В технике для идеальной колебательной системы определение резонанса и отдельная настройка резонансного режима работы возможны по трем критериям:

- максимальной амплитуде колебания;
- нулевой фазе между силой и виброскоростью;
- гармонической форме виброскорости.

На практике для точной настройки резонанса КС требует два датчика: датчик силы многослойного пьезоактюатора и датчик ускорения (акселерометр).

2. Показано, что для практических целей можно использовать дополнительные критерии: амплитуду сигнала датчика силы и синусоидальные формы сигнала датчика силы.

3. Для идеальной КС с чисто синусоидальной силой возбуждения по всей АЧХ вибро смещения (вибро ускорения) в установившемся режиме работы форма колебаний подвижных частей УЗ излучателя будет синусоидальной.
4. При математическом моделировании влияние собственных частот КС, неточности изготовления и настройки УЗ излучателя приблизительно можно учесть импульсным периодическим возмущением. При этом квази-гармонические колебания КС появляются только в районе резонансных частот, а чистая синусоида вибро смещения – только на резонансе.
5. Экспериментально доказано, что настройка на резонансный режим КС УЗ излучателя резонансного типа возможна по одному датчику силы, который расположен последовательно с многослойным пьезоактюатором и не требует дополнительных конструктивных элементов для его крепления, что особенно важно при одностороннем доступе к объекту исследования.
6. Сигналы силы пьезоактюатора и ускорения качественно похожи по всей АЧХ и имеют максимальное значение амплитуды на близких частотах. Самые гармонические сигналы силы и ускорения наблюдаются в районе резонансной частоты, что позволяет более точно настроить КС на резонанс.

7. Настройка резонанса КС по сигналу датчика силы многослойного пьезоактюатора при одностороннем доступе к объекту существенно упрощает процесс обработки УЗ излучателем резонансного

типа технологических жидкостей через элементы конструкции резервуара.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Идентификация параметров механической системы вибрационного электромагнитного активатора по граничным окolorезонансным частотам / А.Н. Гаврилин, С.Н. Кладиев, А.С. Глазырин, Е.В. Боловин, В.И. Полищук // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2019. – Т. 330. – № 4. – С. 158–177.
3. Нелинейное алгебраическое оценивание индуктивности вибрационного электромагнитного активатора по кривой затухания тока / А.С. Глазырин, В.В. Аникин, Д.С. Буньков, Д.И. Антяскин, Ю.Н. Старцева, В.З. Ковалев, Р.Н. Хамитов, С.Н. Кладиев, А.А. Филиппас // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2020. – Т. 331. – № 1. – С. 148–157.
4. 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.
5. 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.
6. Мансфельд А.Д., Рейман А.М. О возможности измерения коэффициента затухания ультразвука в слоистых средах при одностороннем доступе к объекту // *Акустический журнал*. 2011. – Т. 57. – № 2. – С. 211–218.
7. Азин А.В., Богданов Е.П., Рикконен С.В. Моделирование передачи акустической энергии через многослойную систему для измерения реологических свойств углеводородов // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2023. – Т. 334. – № 3. – С. 186–196.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. Пановко Я.Г. Основы прикладной теории упругих колебаний. – М.: Изд-во «Машиностроение», 1967. – 312 с.
14. Исакович М.А. Общая акустика. – М.: Наука, 1973. – 489 с.
15. 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.
16. 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.
17. 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.
18. 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.
19. 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.
20. 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.
21. 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.

Поступила: 01.08.2023 г.

Прошла рецензирование: 18.09.2023 г.

Информация об авторах

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

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

Васильев А.В., аспирант, инженер-исследователь Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Национального исследовательского Томского государственного университета.

Пономарев С.А., инженер-исследователь Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Национального исследовательского Томского государственного университета.

Пономарев С.В., доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, заведующий отделом Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Национального исследовательского Томского государственного университета.

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

UDC 534.22

CONFIGURATIONS OF ULTRASONIC EMITTER RESONANCE MODES FOR UNILATERAL ACCESS TO AN OBJECT

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

Eugene P. Bogdanov²,
bep@tpu.ru

Alexander V. Vasilyev¹,
alphantomsk@yandex.ru

Sergey A. Ponomarev¹,
doc.sergeyponomarev@gmail.com

Sergey V. Ponomarev¹,
psv@niipmm.tsu.ru

Sergey V. Rikonen¹,
s.rikonen@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. To prepare high-viscosity oil for transport, a number of methods are used in practice: thermal, chemical and the method of physical influences. Ultrasonic exposure of hydrocarbon raw materials is one of the physical methods. It is necessary to develop an effective method for tuning an ultrasonic emitter for maximum energy transfer into a multilayer technological medium.

Aim: to study resonant operating modes of an ultrasonic emitter in a multilayer system with unilateral access to the object with simplified design of a resonance type ultrasonic emitter.

Objects: oscillating system of an ultrasonic resonant type emitter, multilayer system, physical model of a system «ultrasonic emitter – multilayer system».

Methods: mathematical modeling of linear oscillating system to determine the properties of oscillating system influence and technological factors on the form of vibration oscillations and on the amplitude-frequency characteristics of the system; experimental research on the basis of the physical model «ultrasonic emitter – multilayer system».

Results. The authors have revealed a physical feature of the oscillatory system operation, which consists in the fact that at resonance the form of oscillations of the force signals of a multilayer piezoactor and vibration acceleration signals are purely harmonic in nature. This effect extends to operation of a resonant-type ultrasonic emitter in a short-circuit mode on a multilayer system. It was found that force and vibration acceleration amplitude-frequency characteristics of a multilayer piezoactor are similar to each other. Based on the analysis of theoretical and experimental data, the authors developed the method for adjusting the resonant operating modes of an ultrasonic emitter with unilateral access to an object. This allows simplification and reduction in the emitter design cost. The method for setting up oscillatory systems is applicable for laboratory and industrial installations.

Conclusion. The research results show that in practice, harmonic shape of acceleration and force signals, as well as force amplitude of a multilayer piezoactor can be used as criteria for determining and adjusting the resonance of an oscillatory system. The oscillatory system of a resonant-type ultrasonic emitter can be tuned to resonance according to the shape and amplitude of the signal from the force sensor of the multilayer piezoactor. The force sensor is located in series with the multilayer piezoactor and does not require additional structural elements for its fastening. The ultrasonic emitter design is greatly simplified due to the absence of a vibration acceleration sensor. The method of adjusting the resonance of an oscillatory system using only a force sensor is also applied when operating a resonant-type ultrasonic emitter to a multilayer mechanical system. The developed design and technique for tuning the oscillatory system of a resonant-type ultrasonic emitter can be conveniently used when influencing process fluids through the walls of tanks and storage tanks.

Key words:

ultrasonic emitter, radiation energy, resonance, force sensor, acceleration sensor, 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 FSWM-2020-0036).

REFERENCES

1. 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.
2. Gavrilin A.N., Kladiev S.N., Glazyrin A.S., Bolovin E.V., Polishchuk V.I. Identification of parameters of vibration electromagnetic activator mechanical system using limiting nearreso-

- nance frequency. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 4, pp. 158–177. In Rus.
3. Glazyrin A.S., Anikin V.V., Bunkov D.S., Antyaskin D.I., Startseva Yu.N., Kovalev V.Z., Khamitov R.N., Kladiev S.N., Philipas A.A. Nonlinear algebraic estimation of a vibration electromagnetic activator inductivity by a failing current curve. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 1, pp. 148–157. In Rus.
 4. 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.
 5. 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.
 6. Mansfel'd A.D., Reiman A.M. The possibility of measuring the coefficient of ultrasound attenuation in a one-side accessible layered medium. *Acoustical Physics*, 2011, vol. 57, no. 2, pp. 208–215. In Rus.
 7. Azin A.V., Bogdanov E.P., Rikonen S.V. Simulation of acoustic energy transfer through a multilayer system for changing the rheological properties of hydrocarbons. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 3, pp. 186–196. In Rus.
 8. Azin A.V., Bogdanov E.P., Ponomarev S.A., Maritsky N.N., Rikonen S.V. Mathematical modelling of high-viscosity oil ultrasonic preparation for transport. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 4, pp. 114–122. In Rus.
 9. Azin A.V., Bogdanov E.P., Ponomarev S.A., Maritsky N.N., Rikonen S.V. Mathematical modeling of a resonant-type ultrasonic emitter for preparing high-viscosity oil for transport. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 11, pp. 161–169. In Rus.
 10. Rikonen 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.
 11. 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.
 12. 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.
 13. Panovko Ya.G. *Osnovy prikladnoy teorii uprugikh kolebaniy* [Fundamentals of the applied theory of elastic oscillations]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1967. 312 p.
 14. Isakovich M.A. *Obshchaya akustika* [General acoustics]. Moscow, Nauka Publ., 1973. 489 p.
 15. 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.
 16. 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.
 17. 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.
 18. 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.
 19. 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.
 20. 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.
 21. 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.

Received: 1 August 2023.

Reviewed: 18 September 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.

Alexander V. Vasilyev, postgraduate, research engineer, National Research Tomsk State University.

Sergey A. Ponomarev, research engineer, National Research Tomsk State University.

Sergey V. Ponomarev, Dr. Sc., senior researcher, head of the division, National Research Tomsk State University.

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