

ОБРАБОТКА АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ.
КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

УДК 534.2

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НИЗКОЧАСТОТНЫХ
БИМОРФНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ
И АКТИВАЦИИ НЕФТЯНЫХ СКВАЖИН

© 2017 г. А. Н. Рыбьянец^{а, *}, А. В. Наседкин^б, С. А. Щербинин^а, Е. И. Петрова^а, Н. А. Швецова^а,
И. А. Швецов^а, М. А. Луговая^а

^аНаучно-исследовательский институт физики Южного Федерального университета
344090 Ростов-на-Дону, пр. Стачки 194

^бИнститут математики, механики и компьютерных наук Южного Федерального университета
344090 Ростов-на-Дону, ул. Мильчакова 8а

*e-mail: arybyanets@gmail.com

Поступила в редакцию 24.10.2016 г.

Разработана методика и проведена конечно-элементная оптимизация, а также экспериментальная валидация конструкции и параметров низкочастотных биморфных пьезоэлектрических преобразователей, предназначенных для диагностики и активации нефтяных скважин.

Ключевые слова: конечно-элементное моделирование, биморфный преобразователь, моды колебаний, амплитудно-частотные характеристики.

DOI: 10.7868/S0320791917060120

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы вследствие недостаточно высокой эффективности применяемых технологий извлечения нефти, а также роста освоения залежей тяжелых нефтей, наблюдается заметное уменьшение дебитов добывающих скважин. Вследствие этого актуальными становятся физические технологии повышения нефтеотдачи, в особенности основанные на использовании ультразвука [1]. Воздействие ультразвука на скважину и резервуар, приводящее к увеличению дебита, основано на двух значимых аспектах ультразвуковой обработки: (1) увеличение потока нефти через породу в откачиваемый резервуар и (2) снижение вязкости нефти для облегчения ее перекачки. Ультразвуковые методы повышения нефтеотдачи в сравнении с другими физическими и химическими методами, используемыми для повышения дебита скважин, имеют множество преимуществ, таких как высокая адаптируемость, простота в эксплуатации, низкая стоимость и отсутствие загрязнения окружающей среды [1, 2].

Основной частью ультразвукового оборудования для активации и диагностики состояния нефтяных скважин являются ультразвуковые преобразователи высокой интенсивности. Конструкция ультразвуковых преобразователей является одним из критических факторов, определяющих успешность применения ультразвуковой технологии повышения нефтеотдачи. В настоящее время

разработаны эффективные методы расчета и моделирования акустических полей и различные конструкции ультразвуковых преобразователей высокой интенсивности [3–7]. Наряду с цилиндрическими магнитострикционными и пьезоэлектрическими преобразователями [8] широко используются преобразователи Ланжевена, работающие на частотах 10–20 кГц. Однако для геофизических исследований (каротаж и скважинная геофизика), а также для повышения нефтеотдачи скважин тяжелых нефтей требуются низкочастотные (500 Гц–3 кГц) и более эффективные преобразователи, одним из перспективных типов которых являются биморфные пьезопреобразователи.

Биморфные пьезоэлектрические преобразователи находят широкое применение в современных оптических, электромеханических, пневматических, сейсмических электронных устройствах, а также в аппаратуре медицинского назначения. Конструкции и принципы работы этих пьезопреобразователей хорошо известны и описаны во многих работах. Тем не менее, новые научно-технические вызовы требуют дополнительных исследований конструкций биморфных преобразователей и пьезоэлектрических материалов, в частности для устройств накопления энергии, нанотехнологий, диагностики и активации нефтяных скважин [9–11].

В общем случае биморф состоит из двух тонких склеенных между собой пьезокерамических

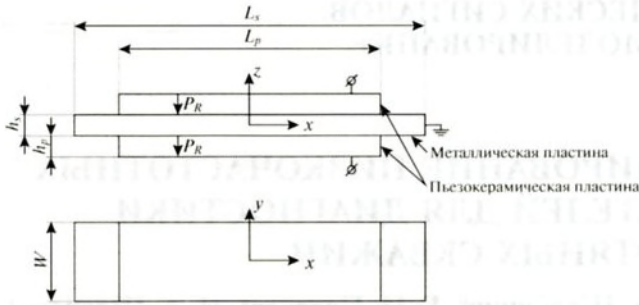


Рис. 1. Схематическое изображение биморфного пьезоэлемента.

пластин с металлической прокладкой между ними или без нее. Поляризация пьезокерамических пластин и полярность электрического поля в них создаются таким образом, чтобы за счет поперечного пьезоэффекта планарные смещения по длине в этих пластинах были противоположными, что приводит к изгибным колебаниям всей конструкции [12, 13].

В настоящей работе рассматривается один из вариантов низкочастотного биморфного преобразователя, предназначенного для диагностики и активации нефтяных скважин. Для оптимизации параметров конструкции биморфного преобразователя выполнены вычислительные эксперименты с использованием конечно-элементных технологий. Проведена также экспериментальная валидация результатов конечно-элементного моделирования.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И МЕТОДОЛОГИЯ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Методика оптимизации амплитудных и частотных характеристик биморфных пьезопреобразователей состоит в последовательном выполнении конечно-элементного модального (частотная оптимизация) и гармонического (амплитудная оптимизация) анализа с использованием в качестве переменных геометрических параметров элементов конструкции биморфа (толщины металлической и пьезокерамических пластин).

Рассмотрим биморфный пьезопреобразователь, представленный на рис. 1 вместе с выбранной декартовой системой координат $Oxuz$. Преобразователь состоит из трех пластин и иногда называется также триморфом. Центральная пластина длины L_s , толщины h_s и ширины W выполнена из нержавеющей стали и жестко закреплена на торцах $x = \pm L_s/2$. На эту пластину наклеены более короткие одинаковые пьезокерамические пластины длины L_p ($L_p < L_s$), толщины h_p и той же ширины W . Пьезокерамические пластины поля-

ризованы в одном направлении, электродирированы по граням $z = \pm h_s/2$, $z = \pm(h_s/2 + h_p)$ и соединены электрически параллельно.

Будем считать, что пьезоэлемент работает в режиме установившихся колебаний в результате подачи на электродирированные поверхности гармонически изменяющихся значений электрических потенциалов φ : $\varphi = Ve^{i\omega t}$ при $z = \pm(h_s/2 + h_p)$, $|x| \leq L_p/2$; $\varphi = 0$ при $z = \pm h_s/2$, $|x| \leq L_p/2$. Здесь ω — круговая частота, связанная с частотой колебаний обычной формулой $\omega = 2\pi f$.

Примем, что пьезокерамические пластины выполнены из пьезокерамики ЦТС-19 со следующим набором параметров: плотность $\rho = 7510$ кг/м³; упругие модули $c_{11}^E = 122$ ГПа, $c_{12}^E = 74$ ГПа, $c_{13}^E = 71$ ГПа, $c_{33}^E = 71$ ГПа, $c_{33}^E = 110$ ГПа, $c_{44}^E = 19.6$ ГПа; пьезомодули $e_{31} = -1.7$ Кл/м², $e_{33} = 16.4$ Кл/м², $e_{15} = 10.3$ Кл/м²; относительная диэлектрическая проницаемость $\epsilon_{11}^S = 913\epsilon_0$, $\epsilon_{33}^S = 873\epsilon_0$, ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума; механическая добротность $Q = 80$ [14, 15]. Для стальной пластины примем параметры изотропного материала (сталь нержавеющая AISI 304): плотность $\rho = 7860$ кг/м³; модуль Юнга $E = 200$ ГПа; коэффициент Пуассона $\nu = 0.29$; добротность $Q = 1000$. Базовые геометрические размеры выбирались следующими: длина стальной пластины $L_s = 134$ мм; длина пьезокерамических пластин $L_p = 100$ мм; ширина пластин $W = 37.5$ мм. Толщина стальной пластины h_s и толщины пьезокерамических пластин h_p варьировались для выбора оптимальной конфигурации.

Компьютерное моделирование биморфного пьезопреобразователя проводилось по методу конечных элементов с использованием программного комплекса ANSYS. В силу симметрии задачи рассматривалась четвертая часть преобразователя $0 \leq x \leq L_s/2$, $0 \leq y \leq W/2$ с соответствующими граничными условиями на поверхностях в плоскостях симметрии $x = 0$ и $y = 0$. Использовалась технология твердотельного моделирования ANSYS “сверху вниз” с управляемыми параметрами геометрических размеров и с построением канонических конечно-элементных гексаэдральных сеток. Основные этапы пьезоэлектрического анализа преобразователя были аналогичны описанному в [16] и включали решение задач на собственные частоты (модальный анализ) и задач об установившихся колебаниях (гармонический анализ).

Для расчетов в режиме установившихся колебаний решалась стандартная для конечно-элементного пьезоэлектрического анализа задача относительно векторов узловых комплексных амплитуд перемещений U и электрических потенциалов Φ [16, 17]:

$$(-\omega^2 M_{uu} + i\omega C_{uu} + K_{uu})U + K_{u\varphi}\Phi = F_u, \quad (1)$$

$$K_{u\varphi}^T U - K_{\varphi\varphi}\Phi = -F_\varphi, \quad (2)$$

где M_{uu} – матрица масс, C_{uu} – матрица демпфирования, K_{uu} – матрица жесткости, $K_{u\varphi}$ – матрица пьезоэлектрической связности, $K_{\varphi\varphi}$ – матрица диэлектрической проницаемости, ω – круговая частота, связанная с частотой колебаний f обычной формулой $\omega = 2\pi f$. Ненулевые векторы правых частей F_u и F_φ здесь появляются при учете подаваемых на электроды потенциалов.

Для стальной пластины использовались упругие гексаэдральные двадцатиузловые конечные элементы ANSYS SOLID95, обеспечивающие квадратичные аппроксимации перемещений по каждой из пространственных переменных, а для пьезоэлектрических пластин – аналогичные по типам аппроксимаций для перемещений и электрического потенциала гексаэдральные двадцатиузловые элементы SOLID226 с опциями пьезоэлектрического анализа [16, 17].

Матрица демпфирования определялась через частотно-независимые коэффициенты демпфирования ξ_m , различные для пьезоэлектрических пластин ($m = 1, 3$) и для стальной пластины ($m = 2$). Эти коэффициенты связаны с добротностями Q_m соответствующих материалов по формуле $\xi_m = 1/(2Q_m)$. Сама матрица демпфирования вычислялась согласно выражению [16, 17] $C_{uu} = \frac{2}{\omega} \sum_{m=1}^3 \alpha \xi_m K_{uum}$, где K_{uum} – матрица жесткости подтела с номером m , \sum^a – операция ансамблирования конечно-элементных матриц.

В модальном анализе резонансные частоты ω_k являются неизвестными и определяются вместе с соответствующими собственными векторами U_k и Φ_k из решения обобщенной задачи на собственные значения [16, 17]:

$$(-\omega^2 M_{uu} + \bar{K}_{uu})U = 0, \quad (3)$$

где $\bar{K}_{uu} = K_{uu} + K_{u\varphi} K_{\varphi\varphi}^{-1} K_{u\varphi}^T$, $\Phi = K_{\varphi\varphi}^{-1} K_{u\varphi}^T U$.

Из (3) можно получить, что собственные частоты ω_k связаны с соответствующими модами колебаний U_k по формуле $\omega_k^2 = R(U_k)$, где $R(U_k) = (U_k^* \bar{K}_{uu} U_k) / (U_k^* M_{uu} U_k)$ – частное Рэлея.

При построении канонической конечно-элементной сетки для базовых геометрических параметров использовалось разбиение полудлины $L_p/2$ пьезокерамической пластины на 25 элементов, разбиение толщины h_p на 2 элемента, толщины h_s – на 2 элемента, разбиение разности полудлин стальной и пьезокерамических пластин

$(L_s - L_p)/2$ на 6 элементов и разбиение полужирности $W/2$ на 4 элемента. Данная густота сетки обеспечивала достаточную стабилизацию и точность конечно-элементных расчетов для низкочастотных колебаний. При варьировании толщины также контролировалось разбиение по длинам и ширине из условия стабилизации относительных величин резонансных частот в пределах 5%.

ЧАСТОТНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ (МОДАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ)

Поскольку разрабатываемый биморфный пьезопреобразователь предназначен для работы на очень низких частотах (500 Гц–1 кГц), то наибольший интерес представляет его первая мода колебаний U_{r1} как самая низкочастотная, ярко выраженная и наиболее эффективная. Для исследуемого биморфа эта мода является изгибной, электрически активной и в пренебрежении потерями вместе с соответствующей круговой резонансной частотой ω_{r1} может быть найдена как первая пара решений ω_1, U_1 задачи (3) при нулевых значениях потенциала ($\varphi = 0$) на всех четырех электродах ($z = \pm(h_s/2 + h_p)$; $z = \pm h_s/2$). При этом вектор U_1 будет масштабироваться из условия ортонормированности системы собственных векторов по матрице масс, т.е. длина вектора U_1 будет определяться в соответствии с формулой

$U_1^* M_{uu} U_1 = 1$. Таким образом, анализ зависимости первой резонансной частоты от размеров биморфа может быть проведен на основе решений обобщенной задачи на собственные значения (3). Кроме того, заменяя условия короткозамкнутости электродов $z = \pm(h_s/2 + h_p)$ на условия для свободных электродов, можно из соответствующей измененной задачи (3) найти первую частоту электрического антирезонанса ω_{a1} и динамический коэффициент электромеханической связи $k_d = (1 - \omega_{r1}^2 / \omega_{a1}^2)^{1/2}$.

По описанной выше технологии в рамках частотного анализа были выполнены расчеты зависимости частоты первой моды собственных колебаний биморфа от толщин металлической и пьезокерамических пластин (длины пластин полагались постоянными, как описано выше).

На рис. 2 представлены зависимости частоты первой моды колебаний биморфа от толщины металлической пластины при различных фиксированных толщинах пьезокерамических пластин.

Как можно видеть из рис. 2, резонансная частота в зависимости от толщины металлической пластины возрастает быстрее, когда эта толщина мала, и медленнее – когда она сравнима с толщинами пьезокерамических пластин. Формы колебаний на этой частоте также различаются при

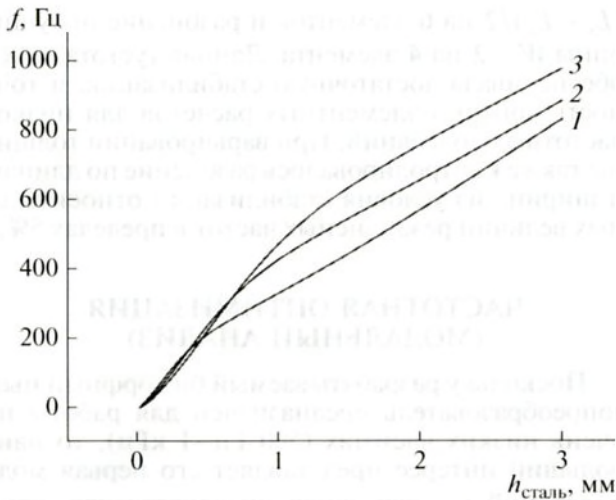


Рис. 2. Зависимость частоты первой моды колебаний биморфа от толщины металлической пластины при фиксированной толщине пьезокерамических пластин: 1 – 1 мм, 2 – 2 мм, 3 – 3 мм.

толщинах металлической пластины, сравнимых с толщинами пьезокерамических пластин (рис. 3а), и при малых толщинах (рис. 3б).

При малых h_s часть конструкции преобразователя при $|x| \leq L_p$ движется почти как жесткое целое вдоль оси y , а основные деформации сосредоточены в областях $|x| > L_p$ (рис. 3а). При возрастании толщины металлической пластины h_s деформации становятся более заметными и при $|x| \leq L_p$ (рис. 3б). А поскольку в частном Рэлея $R(U_1)$ числитель описывает удвоенную потенциальную энергию деформаций, то при увеличении толщины h_s от малых значений в зоны заметных деформаций вовлекаются все большие части преобразователя, что и объясняет быстрый рост резонансной частоты при малых h_s . При толщинах металлической пластины h_s , близких к нулю, колебательная система теряет механическую связность.

На рис. 4 представлены зависимости частоты первой моды колебаний биморфа от толщины пьезокерамических пластин при фиксированных толщинах металлической пластины.

Как можно видеть из рис. 4, значения резонансных частот для более толстых металлических пластин существенно выше, чем для тонких. Зависимости резонансных частот от толщины пьезокерамических пластин имеют немонотонный характер с характерным минимумом при отношениях $h_p/h_s \sim 1/4$. При увеличении толщины пьезокерамических пластин резонансные частоты возрастают вследствие повышения эффективной жесткости конструкции.

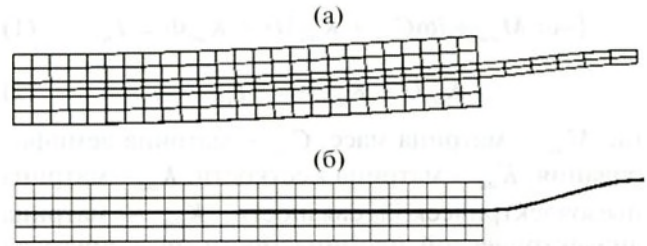


Рис. 3. Моды колебаний биморфа на первой резонансной частоте при (а) $h_s = 1.5$ мм, $h_p = 3$ мм и (б) $h_s = 0.015$ мм, $h_p = 3$ мм.

При приближении толщины пьезокерамических пластин к нулю резонансная частота начинает возрастать, приближаясь к собственной частоте резонанса металлической пластины.

Представленные зависимости демонстрируют возможность оптимизации частотных характеристик биморфа путем варьирования его геометрических параметров.

АМПЛИТУДНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ (ГАРМОНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ)

Представленный выше частотный анализ, выполненный на основе решения задачи (3), не учитывает амплитуду мод колебаний, которые важны для практического использования биморфного преобразователя. В связи с этим было проведено исследование амплитуды установившихся вынужденных колебаний биморфа на первой резонансной частоте в зависимости от его геометри-

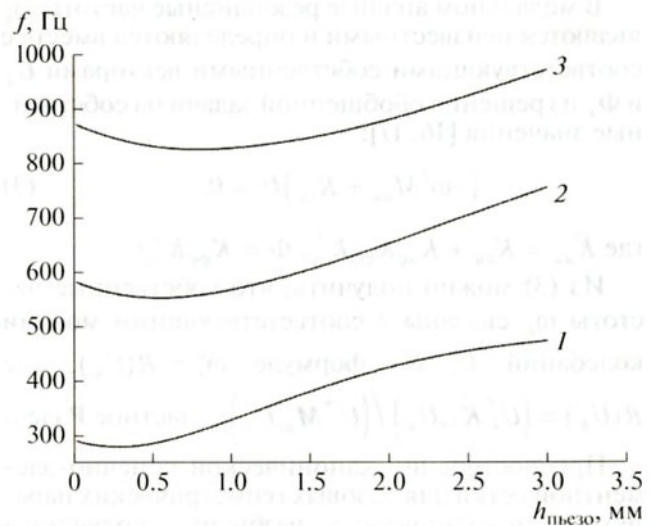


Рис. 4. Зависимость частоты первой моды колебаний биморфа от толщины пьезокерамических пластин при фиксированной толщине металлической пластины: 1 – 1 мм, 2 – 2 мм и 3 – 3 мм.

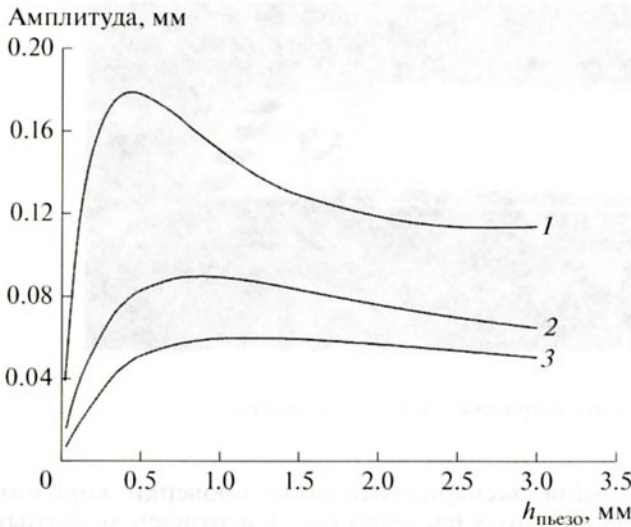


Рис. 5. Зависимость амплитуды установившихся вынужденных колебаний биморфа на первой резонансной частоте от толщины пьезокерамических пластин при фиксированной толщине металлической пластины: 1 – 1 мм, 2 – 2 мм, 3 – 3 мм.

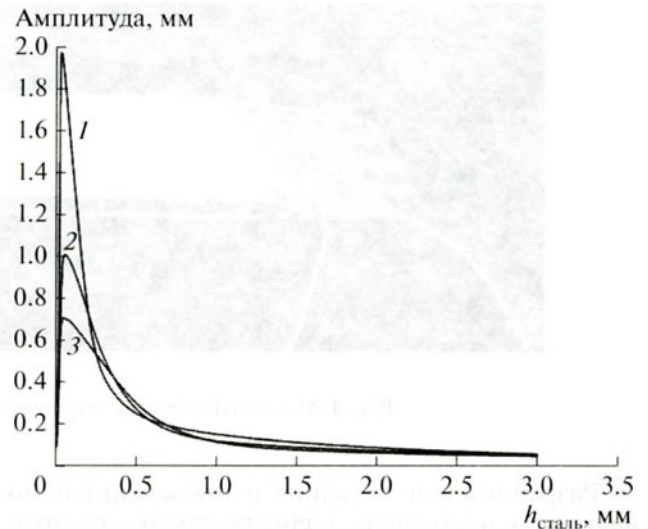


Рис. 6. Зависимость амплитуды установившихся вынужденных колебаний биморфа на первой резонансной частоте от толщины металлической пластины при фиксированной толщине пьезокерамических пластин: 1 – 1 мм, 2 – 2 мм, 3 – 3 мм.

ческих параметров. Для нахождения амплитуд решалась задача об установившихся колебаниях (1), (2) при гармонически изменяющейся разности потенциалов между электродами пьезоэлектрических пластин. Во всех расчетах задавалась одно и то же значение напряженности электрического поля $E_z = 10$ В/мм, при этом амплитуда потенциала на электродах $z = \pm(h_s/2 + h_p)$ зависела от толщины пьезоэлектрической пластины: $V = h_p E_z$. Полученные результаты представлены на рис. 5, 6.

Графики на рис. 5 построены для фиксированных толщин металлической пластины, при этом варьировалась толщина пьезокерамических пластин. Как можно видеть из рис. 5, значения амплитуды установившихся вынужденных колебаний для тонких металлических пластин существенно превышают соответствующие значения для толстых пластин.

Зависимости, представленные на рис. 5, являются немонотонными и имеют выраженные максимумы при отношениях $h_p/h_s \sim 1/2$. При меньших значениях толщин пьезокерамических пластин амплитуда колебаний резко уменьшается, что объясняется невозможностью деформации толстой стальной пластины тонкими пьезокерамическими пластинами. При увеличении толщины пьезокерамических пластин амплитуда колебаний плавно уменьшается вследствие увеличения жесткости системы.

Графики на рис. 6 построены для различных фиксированных толщин пьезокерамических пластин, при этом варьировалась толщина металлической пластины. Амплитуда колебаний биморфа

растет с уменьшением толщины стальной пластины. Все полученные зависимости имеют характерные максимумы при толщинах стальной пластины равной ~ 0.1 мм, при дальнейшем уменьшении толщины амплитуды колебаний стремятся к нулю, что обусловлено отмеченной выше потерей системной механической связности. Моды колебаний биморфа в этом случае аналогичны показанным на рис. 3б, а частоты собственных колебаний в этой области также близки к нулю.

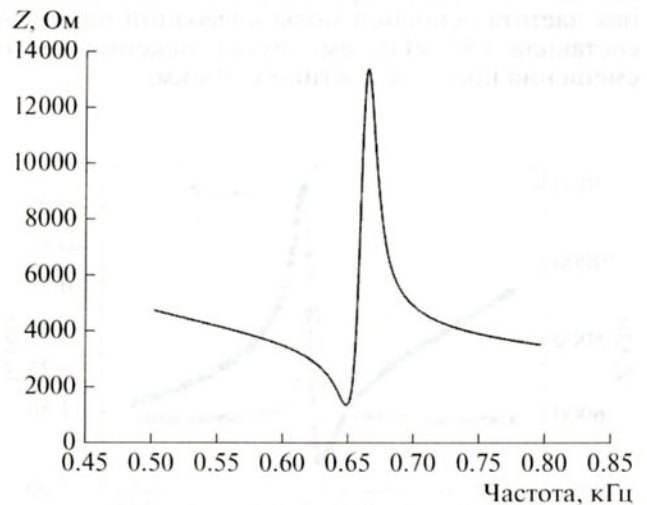


Рис. 7. Рассчитанная амплитудно-частотная характеристика биморфного пьезопреобразователя: толщина пьезокерамических пластин 2 мм, толщина стальной пластины 2 мм.

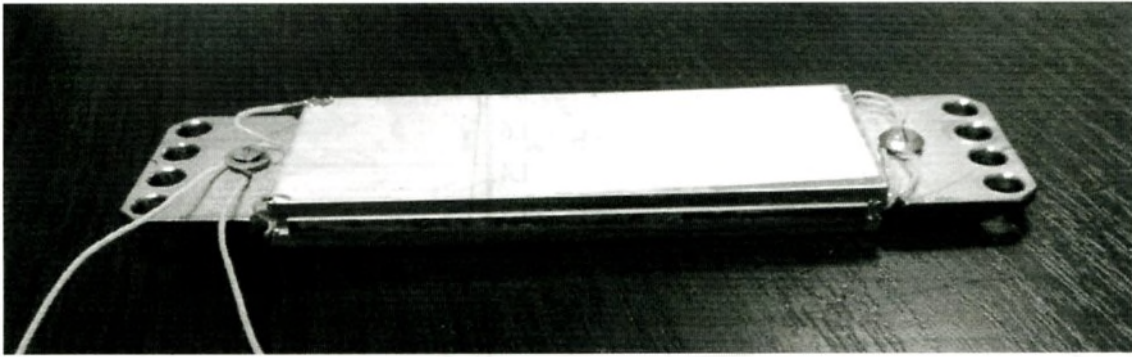


Рис. 8. Макетный образец биморфного пьезоэлектрического преобразователя.

Разработанная методика и проведенный модальный и частотный анализ позволяют оптимизировать конструкцию и геометрические размеры триморфного преобразователя с учетом конкретных требований и предполагаемого применения. Критерием оптимального выбора является максимальная амплитуда основной моды колебаний при заданном профиле смещений и, следовательно, максимальная эффективность излучения и приема триморфного преобразователя на заданной частоте.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ВАЛИДАЦИЯ

В результате анализа полученных данных в качестве оптимальных размеров биморфного пьезоэлемента были выбраны следующие: толщина пьезокерамических пластин 2 мм, толщина стальной пластины 2 мм. На рис. 7 показана расчетная амплитудно-частотная характеристика оптимизированного биморфного пьезопреобразователя. Для данной конфигурации расчетная резонансная частота основной моды колебаний биморфа составила 653 кГц, амплитуда максимального смещения при этом достигает 80 мкм.

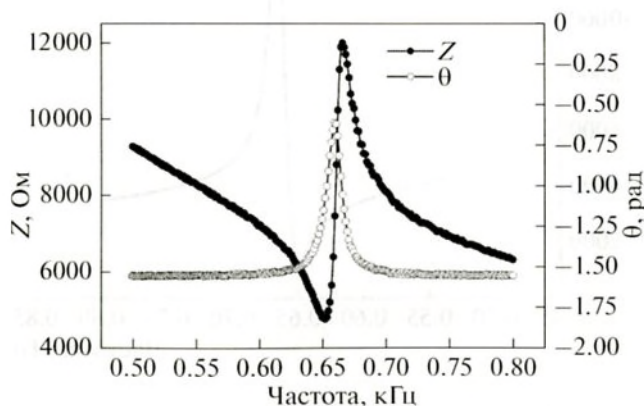


Рис. 9. Измеренный импедансный спектр биморфного пьезопреобразователя.

Для экспериментальной проверки конечно-элементных расчетов был изготовлен макетный образец биморфного пьезопреобразователя (рис. 8) с выбранными геометрическими размерами и параметрами материалов, указанными в разделе 1 (материал пьезокерамических пластин — ЦТС-19М, материал стальной пластины — сталь нержавеющей AISI 304).

Измерения импедансного спектра выполнялись с помощью анализатора импеданса Agilent 4294A и программного пакета PRAP [18, 19]. Статические и динамические измерения амплитуды колебаний биморфного пьезопреобразователя выполнялись с помощью индукционного измерителя и программы характеристики электромеханического отклика STEP [20].

Импедансный спектр макетного образца биморфного пьезопреобразователя, измеренный с использованием программы PRAP, приведен на рис. 9. Сравнение рис. 7 и рис. 9 показывает хорошее совпадение расчетного и экспериментального значений резонансной частоты биморфного преобразователя. Отличия расчетных и экспериментальных значений импеданса обусловлено недостаточно точным учетом механической добротности элементов биморфа, а также граничных условий при закреплении металлической пластины при моделировании в ANSYS.

Максимальная амплитуда перемещений при подаче постоянного напряжения 100 В, измеренная с помощью программы STEP, составила 10 мкм, а в динамическом режиме установившихся колебаний при возбуждении синусоидальным сигналом 100 В — 80 мкм, что хорошо согласуется с результатами конечно-элементного моделирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана методика и проведено конечно-элементное моделирование параметров биморфного пьезопреобразователя. Выполненные расчеты показали возможность оптимизации амплитудных и частотных характеристик биморфного

пьезопреобразователя в широком диапазоне параметров. Проведенный модальный и гармонический анализ позволил оптимизировать конструкцию и геометрические размеры биморфного преобразователя с учетом конкретных требований и предполагаемого применения. Проведена экспериментальная валидация конечно-элементных расчетов. Разработанный низкочастотный биморфный преобразователь характеризуется высокой эффективностью в режимах излучения и приема и может быть использован для диагностики при геофизических исследованиях, а также акустической активации нефтяных скважин.

Отметим, что в настоящей работе не учитывалось влияние внешней среды, но предварительные расчеты показали, что, несмотря на существенное влияние параметров акустической нагрузки (вязкость, плотность, акустический импеданс), выбранные критерии оптимизации остаются справедливыми и позволяют повысить эффективность акустического излучения разработанного биморфного преобразователя. Более подробный анализ влияния внешней среды (нефть, глиноводяные растворы, используемые при каротаже и геофизических исследованиях нефтяных скважин) на параметры и эффективность акустического излучения биморфного преобразователя будут представлены в отдельной статье.

Отдельные части работы выполнены при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (проект № 02.G25.31.0184, проект № БЧ0110-11/2017-44 базовой части госзадания, № 9.5070.2017/ВУ для второго автора).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Abramova A.V., Abramov A.V., Bayazitov V.M., Gerasin A.M., Pashin D.M.* Ultrasonic technology for enhanced oil recovery // *Engineering*. 2014. V. 6. P. 177–184.
2. *Makarev D.I., Rybyanets A.N., Sukhorukov V.L.* Anomalous viscosity of high-molecular petroleum fractions in process of relaxation after high-intensity ultrasonic treatment // *Indian Journal of Science and Technology*. 2016. V. 9. Issue 29. Article number 99457.
3. *Wang Zhenjun, Xu Yuanming, Bajracharya Suman.* Research status and development trend of ultrasonic oil production technique in China // *Ultrasonics Sonochemistry*. 2015. V. 26. № 9. P. 1–8.
4. *Wang Zhenjun, Xu Yuanming, Gu Yuting.* Lithium niobate ultrasonic transducer design for Enhanced Oil Recovery // *Ultrasonics Sonochemistry*. 2015. V. 27. № 11. P. 171–177.
5. *Rybyanets A.N., Naumenko A.A., Shvetsova N.A., Khokhlova V.A., Sapozhnikov O.A., Berkovich A.E.* Theoretical modeling and experimental study of HIFU transducers and acoustic fields // In: *Advanced Materials: Manufacturing, Physics, Mechanics and Applications*. Springer Proceedings in Physics. 2016. V. 175. Chapter 44. P. 621–638.
6. *Goland V., Kushkuley L., Mirman S., Zadok Y., Ben-Ezra S., Shalgi A., Rybyanets A.* Experimental and theoretical study of strongly focused high intensity ultrasound // *Proc. 2007 IEEE Ultrason. Symp.* 2007. Article number 4409901. P. 1305–1308.
7. *Свердлин Г.М.* Прикладная гидроакустика. СПб: Судостроение, 1990. 320 с.
8. *Свердлин Г.М.* Гидроакустические преобразователи и антенны. Ленинград: Судостроение, 1980. 232 с.
9. *Rios S.A., Fleming A.J.* A new electrical configuration for improving the range of piezoelectric bimorph benders // *Sensors and Actuators A*. 2015. V. 224. P. 106–110.
10. *Rybyanets A.N.* Ceramic piezocomposites: modeling, technology, and characterization // In: *Piezoceramic Materials and Devices*. Nova Science Publishers Inc., 2010. Chapter 3. P. 113–174.
11. *Rybyanets A.N., Zaharov Y.N., Raevskii I.P., Akopjan V.A., Rozhkov E.V., Parinov I.A.* Development of new piezoelectric materials and transducer designs for energy harvesting devices // In: *Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications*. Nova Science Publishers Inc., 2013. Chapter 22. P. 275–308.
12. *Lumentut M.F., Howard I.M.* Analytical and experimental comparisons of electromechanical vibration response of a piezoelectric bimorph beam for power harvesting // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2013. V. 36. P. 66–86.
13. *Шляхин Д.А.* Вынужденные осесимметричные колебания пьезокерамической тонкой биморфной пластины // *Изв. РАН. Механика твердого тела*. 2013. № 2. С. 77–85.
14. *Rybyanets A.N.* Advanced functional materials: modeling, technology, characterization, and applications // In: *Advanced Materials: Manufacturing, Physics, Mechanics and Applications*. Springer Proceedings in Physics. 2016. V. 175. Chapter 15. P. 211–228.
15. *Lugovaya M.A., Naumenko A.A., Rybyanets A.N., Shcherbinin S.A.* Complex material properties of porous piezoelectric ceramics // *Ferroelectrics*. 2015. V. 484. Issue. 1. P. 87–94.
16. *Наседкин А.В.* Моделирование пьезоэлектрических преобразователей в ANSYS: учебное пособие. Ростов-на-Дону: изд-во ЮФУ, 2015. 176 с.
17. ANSYS. Theory reference for ANSYS and ANSYS Workbench. Rel.11. Ed. *P. Kothnke*. Canonsburg, ANSYS Inc., 2007. 1072 p.
18. *Rybyanets A.N., Nasedkin A.V.* Complete characterization of porous piezoelectric ceramics properties including losses and dispersion // *Ferroelectrics*. 2007. V. 360. Issue 1. P. 57–62.
19. *Rybyanets A.N., Naumenko A.A., Shvetsova N.A.* Characterization techniques for piezoelectric materials and devices // In: *Nano- and Piezoelectric Technologies, Materials and Devices*. Nova Science Publishers Inc., 2013. Chapter 1. P. 1–50.
20. *Shcherbinin S.A., Shvetsov I.A., Lugovaya M.A., Naumenko A.A., Rybyanets A.N.* Electromechanical response characterization of piezoelectric materials // In: *Proceedings of the 2015 International Conference on Physics, Mechanics of New Materials and Their Applications*. Nova Science Publishers Inc., 2016. Chapter 53. P. 399–406.