УДК 620.179.16:534.14

МНОГОЧАСТОТНЫЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЛАНЖЕВЕНА

© 2019 г. А.А. Вьюгинова^{1,*}

¹ СПбГЭТУ «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Россия 197376 Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5 E-mail:*AAVyuginova@etu.ru

> Поступила в редакцию 30.10.2018; после доработки 10.01.2019; принята к публикации 15.02.2019

Классические преобразователи Ланжевена, используемые в различных ультразвуковых системах как источник интенсивных ультразвуковых колебаний, имеют одну рабочую частоту, соответствующую полуволновому резонансу конструкции преобразователя. В данной работе предложена и исследована конструкция преобразователя Ланжевена с четырьмя рабочими частотами в диапазоне 20—70 кГц, которые соответствуют четырем изгибным модам передней накладки преобразователя. Конструкция преобразователя была разработана и оптимизирована с помощью метода конечных элементов, затем преобразователь был изготовлен и исследован экспериментально. Результаты исследования показали, что предлагаемый преобразователь обеспечивает эффективное селективное возбуждение ультразвуковых колебаний на четырех частотах.

Ключевые слова: ультразвуковой преобразователь, пьезоэлектрический преобразователь, преобразователь Ланжевена, резонансная частота, многочастотный преобразователь, резонансный режим.

DOI:10.1134/S0130308219040018

введение

Поставленная задача разработки данного преобразователя была связана с необходимостью увеличения мощности излучения преобразователя для исследования новых возможностей прозвучивания грунтов в геофизических исследованиях на основе использования резонансных режимов излучения. При этом необходимым условием было обеспечение возможности излучения набора частот в заданном диапазоне.

Ультразвук используется в геофизических исследованиях для определения механических свойств и анализа напряженного состояния породы. Проведение таких исследований сопряжено со значительными сложностями, обусловленными очень большими объемами и неоднородностью исследуемой среды. Традиционные методы ультразвукового прозвучивания (теневой, эхометоды и т. п.) применять для таких исследований крайне сложно, так как высокочастотные ультразвуковые импульсы в таких условиях быстро затухают и не способны распространяться на необходимые расстояния [1]. В [1] также было показано, что использование мощных низкочастотных ультразвуковых преобразователей (преобразователей Ланжевена) может решить данную проблему, значительно увеличив расстояния, доступные для исследований. При этом классические преобразователи Ланжевена, используемые в различных ультразвуковых системах как источник интенсивных ультразвуковых колебаний, имеют одну рабочую частоту, соответствующую полуволновому резонансу конструкции преобразователя. Задача, на решение которой было направлено данное исследование — разработка мощного ультразвукового преобразователя, способного эффективно работать на нескольких резонансных частотах в диапазоне 20-70 кГц (многочастотного преобразователя, работающего на низких резонансных частотах), для обеспечения возможности прозвучивания среды на разных частотах и увеличения информативности метода. Задача создания преобразователей, способных работать на нескольких резонансных частотах, является классической для акустических методов исследования твердого тела [2], но в данном случае она решается для мощного преобразователя Ланжевена.

Преобразователи Ланжевена [3] или составные преобразователи используются в различных ультразвуковых системах как источники мощных ультразвуковых колебаний [1, 4, 5]. Классический преобразователь представляет собой набор пьезоэлектрических колец, к которому присоединяются так называемые передняя и задняя накладки, накладки могут быть как простейшей цилиндрической формы, так и более сложной для решения различных технологических задач, таких как повышение амплитуды колебаний торца преобразователя и стабильности его работы [6—10]. Разнообразные варианты выполнения составных преобразователей, способы улучшения их характеристик исследованы в [11—14].

В данной работе предложен ультразвуковой пьезоэлектрический преобразователь оригинальной конструкции, способный работать на 4 частотах в диапазоне 20—70 кГц, излучающий объемные волны. Предлагаемая конструкция преобразователя исследована с помощью метода конечных элементов, затем изготовлена. Результаты экспериментального исследования подтвердили работоспособность и эффективность разработанного преобразователя.

Данный преобразователь может быть использован в различных технологических ультразвуковых системах, качество работы которых улучшается при использовании нескольких рабочих частот, например, в системах ультразвуковой очистки [15], хирургии [16], а также для различных излучающих систем, которым необходимо использование нескольких рабочих частот, например, при воздействии на микроорганизмы [17].

КОНСТРУКЦИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Был разработан ультразвуковой пьезоэлектрический преобразователь оригинальной конструкции, который обеспечивает селективное эффективное возбуждение ультразвуковых колебаний на 4 дискретных частотах в диапазоне 20—70 кГц. Эскиз и габариты конструкции приведены на рис. 1. Стандартные ультразвуковые преобразователи не способны обеспечить эффективного возбуждения такого количества частот в данном диапазоне и, как правило, работают на одной резонансной частоте — частоте полуволнового резонанса конструкции. В [15] предложена конструкция преобразователя, способного работать на двух резонансных частотах: полуволнового и «волнового» резонансов. При этом речь идет о продольной моде колебаний преобразователя, в предлагаемом преобразователе передняя накладка колеблется в изгибной моде, которая также может быть использована для эффективного излучения [18—20].



Рис. 1. Конструкция преобразователя.

Для эффективного возбуждения конструкции на нескольких ее резонансных частотах необходимо, чтобы рабочие собственные частоты находились на некотором удалении по частоте Δf от соседних нерабочих мод — обычно минимальное значение Δf составляет несколько сотен герц [20]. Предлагаемая конструкция обеспечивает выполнение этого условия, как показано далее, имеет АЧХ, позволяющую конструкции эффективно работать на различных изгибных модах.

АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИИ

Свободные колебания предлагаемого преобразователя были исследованы с помощью метода конечных элементов (МКЭ) в программном пакете Ansys Multiphysics, механические свойства используемых материалов приведены в табл. 1. При проектировании использовалась пьезокерамика APC-841, полные свойства которой можно найти на сайте производителя [21].

Т	a	б	Л	И	ц	а	1
---	---	---	---	---	---	---	---

	Стальная задняя накладка	Титановая передняя накладка	Пьезокерамика
Плотность, кг/м ³	7800	4500	7600
Модуль Юнга, ГПа	200	112	76
Коэффициент Пуассона	0,3	0,32	0,34

Модель преобразователя приведена на рис. 2. Для моделирования по МКЭ был использован 3D-элемент объемных задач с десятью узлами (тетраэдр), каждый из которых имеет три степени свободы: перемещения в направлении осей *x*, *y* и *z* узловой системы координат.

Рис. 2. Модель преобразователя.

В результате модального анализа были получены 4 собственные рабочие частоты и соответствующие собственные формы колебаний, причем каждая из рабочих частот находится на достаточном удалении от соседних мод, что позволяет избежать влияния соседних мод [22, 23] и обеспечивает возможность эффективной работы — в табл. 2 приведены частоты свободных колебаний преобразователя, частоты соседних мод и разница между ними. Все остальные многочисленные частоты, кроме обозначенных рабочих, в диапазоне 20—70 кГц расположены очень близко друг к другу.



Результаты численного моделирования данных четырех мод приведены на рис. 3, показана форма изгибной моды колебаний передней накладки преобразователя.

Т	а	б	Л	И	ц	а	2
---	---	---	---	---	---	---	---

Рабочая мода, Гц	20173		32480		48691		66181	
Соседние моды, Гц	19822	21834	31762	34909	48164	51230	64759	66561
Δƒ, Гц	351	1661	718	2429	527	2539	1422	380



Рис. 3. Собственные частоты и моды колебаний передней накладки преобразователя: *а* — мода колебаний на частоте 20 173 Гц; *б* — мода колебаний на частоте 32 480 Гц; *в* — мода колебаний на частоте 48 631 Гц; *г* — мода колебаний на частоте 66 181 Гц.

РЕЗУЛЬТАТЫ

По результатам проектирования были изготовлены передняя накладка на пьезоэлектрический преобразователь оригинальной конструкции из титанового сплава, остальные детали преобразователя и проведены его испытания. Внешний вид передней накладки снизу (*a*) и преобразователя (б) приведены на рис. 4.



Рис. 4. Передняя накладка преобразователя (а) и преобразователь (б).

Вынужденные колебания преобразователя были исследованы с помощью оборудования Tektronix TBS 1052B. Было подтверждено, что разработанный ультразвуковой пьезоэлектрический преобразователь имеет АЧХ, которая позволит реализовать селективное эффективное возбуждение ультразвуковых колебаний на 4 дискретных частотах в диапазоне 20—70 кГц (рис. 5).



Рис. 5. АЧХ разработанного преобразователя.



Рис. 6. Преобразователь в корпусе с кабелем.

Измеренные частоты вынужденных колебаний преобразователя приведены в табл. 3. Таким образом, разработанный многочастотный преобразователь способен эффективно работать в четырех режимах, каждому из которых соответствует своя изгибная мода передней накладки. При этом видно, что указанные моды обладают высокой добротностью, и в реальном режиме вынужденных колебаний соседние моды, которые могут взаимодействовать с основными, отсутствуют для первой, третьей и четвертой мод, а для второй моды соседняя мода расположена выше по частоте примерно на 3 кГц.

Таблица З

	f_1	f_2	f_3	f_4
Рабочая мода, Гц	20500	30500	45900	65600

На рис. 6 приведен вид многочастотного преобразователя в корпусе, на рис. 1. показано, что передняя накладка содержит конструкционные элементы, позволяющие удобно закрепить как корпус для задней части преобразователя, так и сам преобразователь.

выводы

Предложена конструкция многочастотного ультразвукового преобразователя Ланжевена, способного эффективно работать на 4-х частотах. Конструкция была исследована с помощью метода конечных элементов, изготовлена, затем были изучены характеристики реальной конструкции. Было подтверждено, что рабочие частоты расположены на достаточном расстоянии, чтобы избежать влияния соседних мод, также они являются высокодобротными, что позволяет эффективно излучать ультразвуковые волны на 4-х частотах в диапазоне 20—70 кГц.

Автор выражает благодарность компании ООО «Ультразвуковая техника — ИНЛАБ» за помощь в разработке системы и проведении экспериментальных исследований.

В дальнейшем планируется проведение экспериментов, связанных с практическим применением разработанного преобразователя в геофизических исследованиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Gallego-Juárez J.A., Graff K.F.* Power Ultrasonics: Applications of High-intensity Ultrasound. Oxford: Woodhead Publishing, 2015. 1166 p.

2. *Ермолов И.Н.* (ред.) Ультразвуковые пьезопреобразователи для неразрушающего контроля. М.: Машиностроение, 1986. 280 с.

3. Langevin P. Патенты Франции Nr. 502913 (1920), Nr. 505703 (1920), Nr. 575435 (1924).

4. Mason T.J., Lorimer J.P. Applied Sonochemistry: Uses of Power Ultrasound in Chemistry and Processing. Weinheim: Wiley-VCH Verlag, 2002. 303 p.

5. Хмелев В.Н., Шалунов А.В., Хмелев С.С., Цыганок С.Н. Ультразвук. Аппараты и технологии. Монография. Бийск: Изд-во Алтайского гос. технич. ун-та, 2015. 688 с.

6. *Eisner E.* Design of sonic amplitude transformers for high magnification // J. Acoust. Soc. Am. 1963. V. 35. P. 1367–1377.

7. *Adachi K., Ueha S.* Modal vibration control of large ultrasonic tools with the use of wave-trapped horns // J. Acoust. Soc. Am. 1990. V. 87. P. 208—214.

8. Bangviwat A., Ponnekanti H.K., Finch R.D. Optimizing the performance of piezoelectric drivers that use stepped horns // J. Acoust. Soc. Am. 1991. V. 90. P. 1223-1229.

9. Peshkovsky S.L., Peshkovsky A.S. Matching a tranducer to water at cavitation: acoustic horn design principles // Ultrasonics sonochemistry. 2007. V. 14. P. 314—322.

10. *Lu X., Hu J., Peng H., Wang Y.* A new topological structure for the Langevin-type ultrasonic transducer // Ultrasonics. 2017. V. 75. P. 1—8.

11. Neppiras E. The pre-stressed piezoelectric sandwich transducer / Ultrasonics international Conf. Proc.1973. P. 295-302.

12. Ranz-Guerra C., Ruiz-Aguirre R.D. Composite sandwich transducers with quarter wavelength radiating layers // J. Acoust. Soc. Am. 1975. V. 58. P. 494–498.

13. *Lin S.* Optimization of the performance of the sandwich piezoelectric ultrasonic transducer // J. Acoust. Soc. Am. 2004. V. 115. P. 182–186.

14. *Lin S., Xu L., Hu W.* A new type of high power composite ultrasonic transducer // Journal of Sound and Vibration. 2011. V. 330. P. 1419—1431.

15. *Lin S*. Study on the multifrequency Langevin ultrasonic transducer // Ultrasonics. 1995. V. 33. P. 445-448.

16. *Feeney A., Lucas M.* A comparison of two configurations for a dual-resonance cymbal transducer // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. 2018. V. 65. No. 3. P. 489–496.

17. Armstrong C.D., Lee C., Matheny A.F. Decreasing microorganisms in fluids using ultrasonic wave technologies / US patent 2016/0356122A1.

18. *Gallego-Juárez J.A., Rodriguez G., Acosta V., Riera E.* Power ultrasonic transducers with extensive radiators for industrial processing // Ultrasonics Sonochemistry. 2010. V. 17. P. 953—964.

19. *Cardoni A., Lucas M.* Enhanced vibration performance of ultrasonic block horns // Ultrasonics. 2002. V. 40. P. 365—369.

20. Andres R.R., Acosta V.M., Lucas M., Riera E. Modal analysis and nonlinear characterization of an airborne power ultrasonic transducer with rectangular plate radiator // Ultrasonics. 2018. V. 82. P. 345—356.

21. Physical and piezoelectric properties of APC materials. [Электронный ресурс] // APC International, Ltd. URL: https://www.americanpiezo.com/apc-materials/physical-piezoelectric-properties.html (Дата обращения: 20.10.2018).

22. Gallego-Juárez J.A., Riera E., Acosta-Aparicio V.M. Modal interactions in high power ultrasonic processing transducers // AIP Conf. Proc. 2008. V. 102. No. 1. P. 595-604.

23. *Cardoni A., Riera E., Blanco A., Acosta V., Gallego-Juárez J.A.*, Modal interactions in ultrasonic plate transducers for industrial applications // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. 2012. V. 226. P. 2044—2052.