

# Ультразвуковые Излучатели для Газовых Сред

Савин И.И., к.т.н., Цыганок С.Н., к.т.н., Лебедев А.Н., Абраменко Д.С.

**Abstract**—Рассматриваются различные типы пьезоэлектрических излучателей акустических колебаний для газовых сред.

**Index Terms**—Ультразвук, ультразвуковые колебания в газовых средах, дисковые излучатели.

## I. INTRODUCTION

Широко используемые технологии зачастую не могут удовлетворить растущие запросы промышленности по увеличению скорости и качества выпускаемой продукции. Поэтому для решения возникающих задач приходится использовать ранее не применявшиеся технологии. Примером такого рода, может служить использование ультразвуковых колебаний высокой интенсивности. Ультразвук находит все большее применение в промышленности в течении последних 20 лет.

Большой перспективой обладает использование ультразвуковых колебаний высокой интенсивности в газовых средах.

Первые исследования проведенные по исследованию ультразвуковых колебаний (УЗК) высокой интенсивности при воздействии на вещества через газовые промежутки показали их высокую эффективность. Например, использование УЗК позволило увеличить эффективность дымоуловительных установок и довести их эффективность до 93-96%. [1]

Основным сдерживающим фактором широкого распространения ультразвуковых излучателей для газовых сред являлась их низкая эффективность.

До недавнего времени основными источниками ультразвуковых колебаний в газовых средах являлись аэродинамические излучатели. Их отличительной особенностью является низкий КПД (39% у лучших образцов), высокий уровень постороннего шума и сложность в эксплуатации.

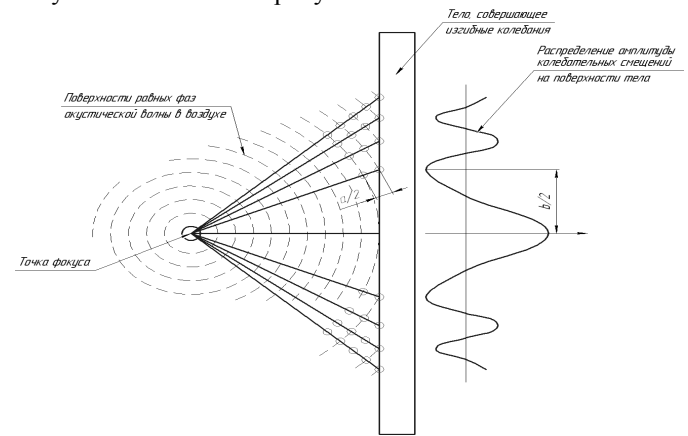
Прогресс в области пьезокерамических элементов позволил разработать на их основе излучатели для воздействия на газовые среды. [2] Конструктивно они представляют собой ультразвуковую колебательную систему с излучателем, имеющим форму диска и создающим акустические колебания в газовой среде. Основная сложность состоит в выборе формы дискового

излучателя. Далее анализируются функциональные возможности дисковых излучателей различной формы.

## II. ДИСКОВЫЕ ИЗЛУЧАТЕЛИ

### A. Фокусирующие излучатели

Принцип работы фазированного фокусирующего излучателя показан на рисунке 1.



a – длина акустической волны в воздушной среде, b – волны изгибных колебаний в твердом теле

Рисунок 1 Принцип работы фазированного фокусирующего излучателя

Поверхность твердого тела (пластины) совершает изгибные колебания, причем распределение их амплитуд колебательных смещений вдоль радиуса пластины имеет вид стоячих волн. Каждая точка колеблющейся поверхности излучает в воздушную среду акустическую волну. Если за счет формы пластины расположить «положительные» максимумы колебательных смещений на расстояниях от центра пластины

$$Y_+ = \sqrt{naL + \frac{n^2 a^2}{4}},$$

где  $n=0,2,4,\dots$ , a- длина звуковой волны в воздухе, L – расстояние от центра пластины до фокуса, и «отрицательные» максимумы на расстояниях

$$Y_- = \sqrt{naL + \frac{n^2 a^2}{4}},$$

где  $n=1,3,5,\dots$ , то волны, излучаемые каждой точкой пластины будут приходить в фокус в одной фазе. Уровень звукового давления в фокусе в таком случае достигает значений 200 дБ и выше, а вокруг фокуса образуются поверхности равных фаз, где уровень звукового давления достигает значений 130-150 дБ. Более подробно

проектирование и использование описано в [3,4].

#### В. Диск с преимущественным излучением одной фазы

Применение фокусирующих излучателей целесообразно только в случае, когда обрабатываемый материал заключен в малом объеме. В связи с этим, представляют интерес излучатели, создающие акустическую волну, близкую к плоской.

Как известно, при центральном возбуждении плоского тонкого диска, радиус которого кратен половине длины изгибной волны в этом материале, распределение колебательных смещений изгибных колебаний вдоль поверхности диска будет иметь вид стоячих волн.

При этом амплитуда колебаний точки поверхности диска, удаленной на расстояние  $r$  от его центра будет определяться выражением:

$$A(r) = A_0 \cdot \cos\left(2\pi \cdot \frac{k \cdot r}{R}\right),$$

где  $A_0$  - амплитуда колебаний в центре диска,  $k$  - целое число полуволн изгибных колебаний, укладываемых на радиусе диска,  $R$  - радиус диска.

На рисунке 2 представлено примерное распределение изгибных колебаний по поверхности плоского диска и излучение отдельных точек поверхности диска в воздух.

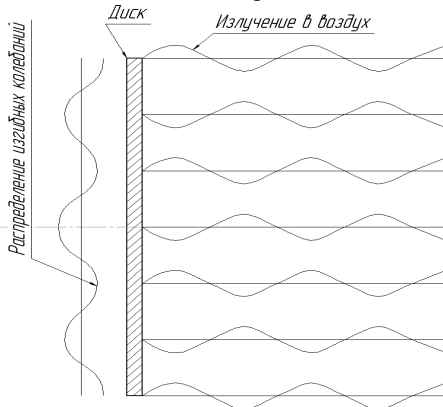


Рисунок 2 - Примерное распределение изгибных колебаний по поверхности плоского диска и излучение отдельных точек поверхности диска в воздух

Из рисунка видно, что различные точки поверхности диска излучают колебания в противоположенных фазах, что приводит к тому, что на некотором расстоянии от диска акустическое излучение взаимно компенсируется.

Для того, чтобы исключить такую нежелательную компенсацию необходимо искусственно снизить амплитуду колебаний участков диска, излучающих колебания в «отрицательной» фазе. Этого можно добиться, увеличив толщину диска в указанных участках. В результате получается диск ступенчато-переменного сечения, схема которого представлена на рисунке 3 (условно показан диск в сборе с полуволновой УЗКС). Здесь же показано распределение амплитуд изгибных колебаний по поверхности диска.

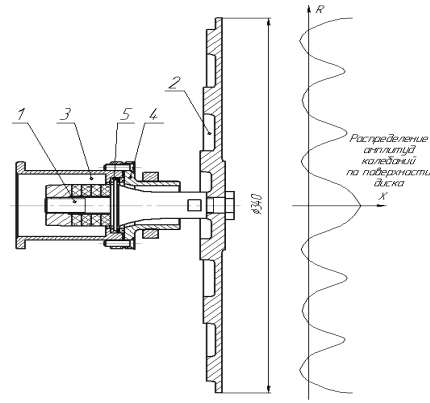


Рисунок 3 – Диск ступенчато-переменного сечения с преимущественным излучением одной фазы колебаний

Из представленного распределения видно, что амплитуда колебаний «отрицательных» зон уменьшена по сравнению с амплитудой колебаний «положительных» зон. Следовательно, полной взаимной компенсации колебаний не происходит.

Излучающие свойства такого дискового излучателя характеризуются его эффективной площадью. Эффективная площадь, это площадь гипотетического поршневого излучателя, который в дальней зоне создает такую же интенсивность излучения, что и диск, совершающий изгибные колебания.

Эффективная площадь определяется в соответствии с выражением:

$$S_{\text{эф}} = \frac{1}{A_0} \int_0^R 2\pi r \cdot A(r) \cdot dr$$

где  $A(r)$  - амплитуда колебаний точек поверхности диска на расстоянии  $r$  - от его центра.

Внешний вид одного из таких излучателей показан на рисунке 4.



Рисунок 4 – Внешний вид излучателя с преимущественным излучением одной фазы колебаний

На рисунке 5 представлено распределение амплитуд изгибных колебаний точек поверхности диска, полученное экспериментально.

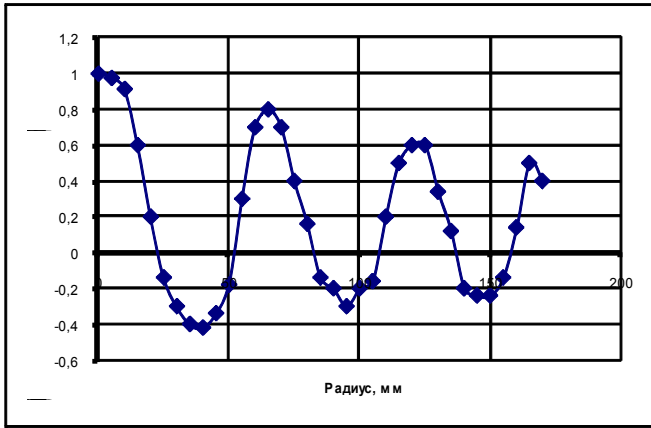


Рисунок 5 – Распределение амплитуд изгибных колебаний излучающей поверхности диска

Общая площадь излучающей поверхности диска составляет 0,091 м<sup>2</sup>. При этом 56% (0,05 м<sup>2</sup>) общей площади совершают колебания в фазе, совпадающей с фазой колебаний на оси диска («положительная» фаза колебаний), а 44% площади (0,041 м<sup>2</sup>) совершают колебания в фазе, противоположной фазе колебаний на оси диска («отрицательная» фаза колебаний). За счет выполнения на тыльной поверхности диска выступов, расположенных в зонах «отрицательной» фазы колебаний, амплитуда колебаний этих зон существенно уменьшена. Поэтому на долю зон «положительной» фазы колебаний приходится 70% общей мощности излучения, в то время как на долю зон «отрицательной» фазы колебаний приходится всего 30% общей мощности излучения. Эффективная площадь излучения составляет 0,036 м<sup>2</sup>.

Характеристики созданного излучателя представлены в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1 – ХАРАКТЕРИСТИКА ИЗЛУЧАТЕЛЯ

Диаметр излучающей поверхности, мм	340
Материал излучателя	титановый сплав ВТ-14
Интенсивность колебаний, создаваемых на расстоянии 0,2 – 1 м, дБ	175-181
Частота излучаемых колебаний, кГц	22,8
Число полуволин изгибных колебаний, укладываемых на радиусе диска	6
Эффективная площадь излучения, м <sup>2</sup>	0,036
Масса излучающего диска, кг	3,2

*С.Нефокусирующий диск с фазовыравнивающими элементами*

Если высоту выступов, расположенных в зонах «отрицательных» фаз диска ступенчато-переменного сечения сделать равной половине длины излучаемой в воздух волны, то излучение «положительных» и «отрицательных» зон будут уже не вычитаться, а складываться. Таким образом фаза излучения всех точек поверхности диска выравнивается. Схема такого

излучателя представлена на рисунке 6.

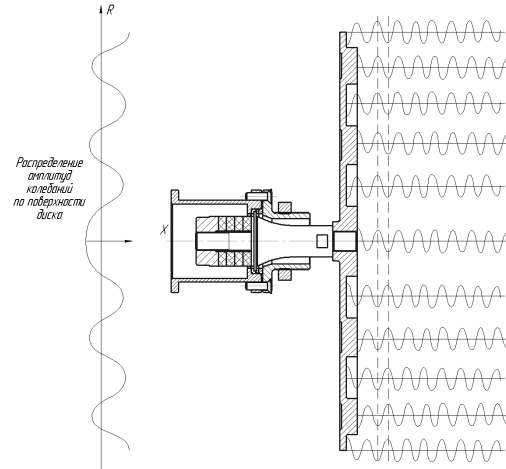


Рисунок 6 – Схема излучателя с фазовыравнивающими элементами

Как видно из рисунка 6, выступы располагаются не на тыльной поверхности диска (как в случае с излучателем с преимущественным излучением одной фазы), а на фронтальной (излучающей). В связи с тем, что излучение «положительных» и «отрицательных» зон в такой конструкции уже не компенсируют, а дополняют друг друга, уменьшение амплитуды колебаний в местах расположения фазовыравнивающих выступов нежелательно. В связи с этим, на тыльной поверхности диска, напротив фазовыравнивающих выступов расположены впадины, которые позволяют увеличить амплитуду колебаний утолщенных участков.

Эффективная площадь излучения для такого диска определяется выражением:

$$S_{\text{эф}} \approx 0.7S$$

где  $S$  - общая излучающей поверхности.

Внешний вид одного из таких излучателей показан на рисунке7.



Рисунок 7 – Внешний вид излучателя с фазовыравнивающими элементами

Характеристики такого излучателя представлены в таблице 2.

ТАБЛИЦА 2 – ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗЛУЧАТЕЛЯ С ФАЗОВЫРАВНИВАЮЩИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Диаметр излучающей поверхности, мм	322
Частота излучающих колебаний, кГц	20
Число полуволн изгибных колебаний, укладываемых на радиусе диска	5
Высота фазовыравнивающих выступов, мм	8,5
Интенсивность излучения, создаваемого на расстоянии 0,2 – 1 м, дБ	177-182
Глубина компенсирующих канавок, мм	1,5
Масса диска, кг	3,2

Исходя из результатов теоретических исследований и натуральных испытаний излучатель способен обеспечить лучшие характеристики акустического поля по сравнению с ранее рассмотренными типами излучателей. Однако в силу особенности конструкции, а именно утолщения металла в зоне соединения с концентратором, прочность болтового соединения оказалась недостаточной, через некоторое время наступает излом болта.

### III. ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИСКОВЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ

Практическое применение трех типов дисковых излучателей позволило оценить сильные и слабые стороны каждой конструкции.

Фокусирующий излучатель позволяет высокоинтенсивное акустическое поле в небольшой зоне фокуса. К недостаткам конструкции относится сложность обеспечения равномерного распределения акустических колебаний с интенсивностью 150 - 170 дБ в большом объеме.

Конструкция излучателя, обеспечивающая эффективность излучения в одном направлении более 70%, может быть рекомендована для серийного производства уже в существующем виде. Конструкция может быть улучшена, за счет установки за излучателем отражателя, который позволит увеличить эффективность излучения.

Конструкция излучателя с фазовыравнивающими элементами по результатам теоретических исследований и натуральных испытаний способна обеспечить лучшие характеристики акустического поля, но на сегодняшнем этапе требует доводки система крепления диска к УЗКС.

### REFERENCES

- [1] А.Э. Кроуфорд Ультразвуковая техника, М.: издательство иностранной литературы, 1958, с.354.
- [2] J.A. Gallego-Juarez New technologies in high-power ultrasonic industrial applications //Ultrasonic symposium. - New York, IEEE, 1994. с. 1343-1352
- [3] V.N. Khmelev, S.N. Tsyganok, A.N. Lebedev I.I. Savin "Transducers of High Intensity for Gas Media", International Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2006: Workshop Proceedings. - Novosibirsk: NSTU, 2006.
- [4] V.N. Khmelev, I.I. Savin, D.S. Abramenko, S.N. Tsyganok, R.V. Barsukov, A.N. Lebedev "Research the Acoustic Cloth Drying Process in Mock-Up of Drum-Type Washing Machine", International Workshops and