

# Многочастотная Ультразвуковая Колебательная Система с Дисковым Излучателем

Владимир Н. Хмелёв, д.т.н., *Senior Member*, IEEE, Андрей Н. Лебедев, *Student Member*, IEEE,  
Сергей Н. Цыганок, к.т.н., Андрей В. Шалунов, к.т.н., Антон Н. Галахов,  
Ксения В. Шалунова, *Student Member*, IEEE

*Бийский технологический институт (филиал) ГОУ ВПО АлтГТУ им И.И. Ползунова*

**Аннотация** – В статье предлагается многочастотная ультразвуковая колебательная система с дисковым излучателем, предназначенная для коагуляции частиц размером от 0,4 мкм. Так же предлагается методика инженерного расчета дисковых излучателей ступенчато переменного типа.

**Ключевые слова** – Коагуляция, дисковый излучатель, многочастотный, УЗКС.

## I. ВВЕДЕНИЕ

**В** НАСТОЯЩЕЕ ВРЕМЯ СУЩЕСТВУЕТ вероятность попадания химического и биологического оружия в руки террористов. Это подтверждают случаи, когда отравляющие вещества распылялись внутри закрытых помещений. Самый страшный из них произошел 19 марта 1995 года, когда в токийском метрополитене был распылен отравляющий газ, в результате чего погибло 12 человек и пострадало более 5000.

Поэтому, остро встает вопрос защиты больших групп людей от воздействия химического и биологического оружия.

Чтобы выбрать методы защиты необходимо понимать механизмы возможного воздействия. Как известно, основными состояниями боевых токсичных химических веществ являются:

- пар (молекулярное состояние вещества);
- не оседающий тонкодисперсный аэрозоль (размеры частиц не более 30 мкм);
- оседающий грубодисперсный аэрозоль (размеры частиц 30–500 мкм);
- капли (размеры частиц более 500 мкм)[1].

В качестве наиболее вероятных кандидатов для использования в качестве биологического оружия чаще всего упоминаются возбудители сибирской язвы, ботулизма, чумы, оспы, туляремии и разнообразные виды вирусной геморрагической лихорадки.

Бактерии могут иметь размеры от 0,3 до 35 мкм в диаметре, вирусы – от 0,01 до 0,3 мкм [2].

Заражение может происходить, как путем распыления вещества в непосредственной близости от людей, так и через систему вентиляции. Последний случай наиболее опасен, так как зараженный воздух распространяется с максимальной скоростью.

Серьезную опасность представляют так же объемно-детонирующие взрывы в шахтах и местах с большим количеством взвешенной пыли, например в мукомольном производстве. Многочисленными исследованиями установлено, что степень дисперсности является существенным фактором, определяющим взрывоопасность пыли. Во взрыве пыли принимают участие частицы размером менее 1000 мкм, причем взрывоопасность пыли с увеличением дисперсности растет. Наибольшую опасность представляет пыль с частицами размером от 10 до 200 мкм.

Из всего выше сказанного можно сделать вывод, что необходимо применение метода и средств, способных предотвратить распространение частиц размером от 0,01 до 30 микрон.

## II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Наиболее эффективными используемыми для очистки воздуха являются НЕРА-фильтры (High-Efficiency Particulate Filter), обеспечивающие задержку частиц диаметром 0,3 микрон с эффективностью 99,97 %.

Но используемые фильтры обладают следующими недостатками:

- не применимы для очистки воздуха на открытых пространствах;
- создают сопротивление воздушному потоку;
- требуют регулярной очистки и замены.

Решением проблемы очистки зараженного воздуха может быть коагуляция частиц отравляющих веществ или пыли с целью укрупнения и ускорения их оседания.

Одним из способов, позволяющих решить поставленную задачу, является акустическая коагу-

ляция. Однако, на сегодняшний день, практически отсутствуют устройства акустической коагуляции аэрозолей. Основным требованием при реализации такой коагуляции является необходимость использования ультразвуковых (УЗ) колебаний, т.е. выше предела слышимости человека и, следовательно, не оказывать вредного воздействия на его организм.

### III. ТЕОРИЯ

Если распределение частиц аэрозоля полидисперсное, а относительная скорость коагуляции частиц в акустическом поле зависит от их плотности, диаметра, частоты и интенсивности излучения, то и характеристики акустического поля должны определяться свойствами частиц. Что касается интенсивности излучения, то чем больше интенсивность звука, тем выше относительная скорость движения частиц аэрозоля [3]. Важным параметром излучателя, характеризующим эффективность коагуляции, является частота излучения. Согласно [4] размер коагулируемых частиц обратно пропорционален частоте. График влияния частоты звуковой волны на долю частиц разного радиуса, подвергающихся колебаниям вместе с газом, представлен на Рис. 1. При доле частиц более 0,8, коагуляция практически не происходит.

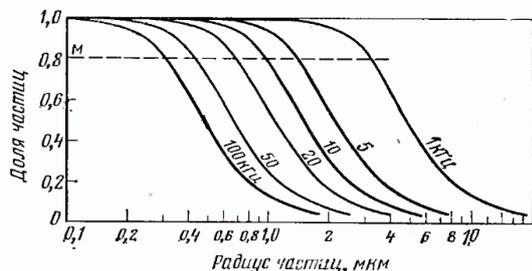


Рис. 1. Влияние частоты звуковой волны на долю частиц разного радиуса, подвергающихся колебаниям вместе с газом

Таким образом, более высокая частота излучения позволяет коагулировать частицы меньшего диаметра, но обеспечение высокой интенсивности акустического излучения этом случае энергетически сложнее. Решение подобной проблемы возможно путем изменения частоты излучателя в ходе работы. Так же следует отметить, что человек менее восприимчив к высокочастотным акустическим колебаниям. Следовательно, рабочая частота излучателя должна быть выше частоты восприимчивости человеческого уха.

В настоящее время для коагуляции аэрозолей используются аэродинамические излучатели, которые обеспечивают преобразование кинетической энергии газового потока в энергию акустических колебаний. К таким излучателям относятся вихревые свистки, свистки с тангенциальным движением струи газа вблизи щели объ-

емного резонатора, клапанные акустические генераторы, газоструйные излучатели Гартмана и их модификации.

Недостатками таких излучателей является необходимость использования компрессоров и большой расход сжатого воздуха, низкий КПД, быстрый износ механических узлов абразивными частицами сжатого газа, ограниченный диапазон излучения. Существенным недостатком газоструйных излучателей является так же длительное время выхода на режим излучения, связанное с необходимостью создания потока газа, а в случае использования автономных источников (газогенераторов) – непродолжительное время работы. Кроме того, эти источники излучения работают эффективно только на одной резонансной частоте и для коагуляции полидисперсного аэрозоля менее эффективны, чем широкополосные излучатели.

Эффективной альтернативой газоструйным излучателям могут служить пьезоэлектрические ультразвуковые колебательные системы. Однако, требующиеся для осуществления процесса коагуляции ультразвуковое воздействие с интенсивностью более 130...140 дБ невозможно обеспечить классическими пьезоэлектрическими ультразвуковыми колебательными системами, генерирующими плоскую акустическую волну.

Поэтому, в основу аппарата, предназначенного для эффективной коагуляции аэрозолей в замкнутых и на открытых пространствах, положены излучатели, обеспечивающие преобразование энергии продольных колебаний пьезоэлектрического преобразователя в изгибные колебания титановых дисков. Преимуществами излучателей дискового типа являются: возможность формирования ультразвуковых колебаний большой мощности и обеспечение перестройки частоты излучения за счет перехода с одной гармоники на другую.

### III. РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ДИСКОВЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ

Основная сложность при проектировании дисковых излучателей заключается в отсутствии методики их расчета. К сожалению, аналитическими зависимостями удастся описать поведение и определить собственные частоты только дисков или пластин постоянной толщины. Диски постоянной толщины обладают одним существенным недостатком практически исключаящим их применение: увеличение частоты вынужденных колебаний приводит к появлению большого числа «паразитных» мод колебаний, что снижает КПД излучателя практически до нуля.

Использование ступенчато-переменных излучателей позволяет избежать «паразитных» мод.

Но, как уже упоминалось ранее, расчет аналитическими методами таких излучателей практически не возможен. В таком случае необходимо использовать приближенные методы расчета.

Один из методов инженерного расчета дискового ступенчато-переменного излучателя, разработанный авторами статьи, состоит в следующем:

1. Необходимый диаметр излучателя ( $d$ ) и его резонансная частота ( $f$ ) определяются исходя из требований технологического процесса.

2. Задается номер гармоники ( $n$ ) на которой будет работать излучатель, как правило, излучатель работает на 5-ой или 7-ой гармонике. Исходя из условия резонанса получаем выражение:

$$d = n\lambda \quad (1),$$

где  $\lambda$  — длина волны изгибных колебаний

3. Для известной частоты и диаметра рассчитывается толщина плоского диска, так называемая «базовая» толщина. Из скорости распространения изгибных колебаний (2) [5]

$$c = \sqrt{2\pi f h} \cdot \sqrt[4]{\frac{E}{3\rho(1-\mu^2)}} \quad (2)$$

где  $c$  — скорость изгибных колебаний,  $f$  — резонансная частота излучателя,  $h$  — толщина диска,  $E$  — модуль Юнга,  $\rho$  — плотность,  $\mu$  — коэффициент Пуассона и выражения (1) находим «базовую» толщину диска:

$$h = \frac{d^2 f}{2\pi n^2} \cdot \sqrt{\frac{3\rho(1-\mu^2)}{E}} \quad (3)$$

4. Базовый диск разбивается на один центральный цилиндр и  $n$  колец. Диаметр цилиндра равен  $\lambda/2$ , ширина всех колец кроме крайнего  $\lambda/2$ . Ширина крайнего кольца  $\lambda/4$ .

5. Последовательным изменением толщины цилиндра и дисков добиваются получения диска ступенчато-переменного сечения. При этом необходимо соблюдать следующие условия:

- Соседние кольца должны иметь разную толщину.
- Центральный цилиндр имеет максимальную толщину.
- Крайнее кольцо имеет минимальную толщину.
- Минимальная толщина диска должна составлять не менее 0,6 от «базовой» толщины.
- Толщина цилиндра может превышать «базовую» толщину не более чем в 2 раза.
- Разница между разными толщинами должна быть не менее 2-3 миллиметров в зависимости от «базовой» толщины.
- Как правило, не стоит использовать более 4-5 колец разной толщины.

- Обязательным условием является, чтобы сумма моментов инерции центрального цилиндра и всех  $n$  колец равнялась моменту инерции «базового» диска, т.е. чтобы справедливым было выражение (4):

$$\frac{1}{12} m_{\text{ц}} (3r_{\text{ц}}^2 + h_{\text{ц}}^2) + \frac{1}{12} \sum_{i=1}^n m_i (3r_i^2 + r_{i+1}^2 + h_i^2) = \frac{1}{12} m_{\text{д}} (3r_{\text{д}}^2 + h_{\text{д}}^2), \quad (4)$$

$$\text{где } r_i = \frac{\lambda}{4} + \sum_{i=1}^{n-1} (i-1) \frac{\lambda}{2}, r_n = \frac{d}{2}, r_{\text{ц}} = \frac{\lambda}{4}.$$

6. Подставив в выражение (4) значения радиусов и массы цилиндра и колец, а так же параметры «базового» диска получается функция нескольких переменных вида (5):

$$f(h_1, h_2, \dots) = \text{const} \quad (5)$$

Наложив граничные условия по пункту 5 можно получить значения толщин ступенчато-переменного диска.

Следует отметить что ступенчато-переменная форма диска позволяет избавиться не только от паразитных гармоник, но и позволяет увеличить амплитуду колебаний на краю излучателя.

Один и тот же дисковый излучатель может создавать колебания разной частоты, работая на разных гармониках. Разработанный, дисковый излучатель ступенчато-переменного сечения диаметром 420 мм (Рис. 2), [6] работает на 14-ти гармониках, частоты которых представлены в Табл. 1.



Рис. 2 – Третья мода колебаний дискового излучателя (4134,5 Гц)

Как указывалось выше, осаждение частиц разных размеров происходит при разной частоте колебаний: чем меньше размеры коагулируемых частиц, тем выше требуемая частота. Дисковый излучатель имеет широкий диапазон рабочих частот и может оказывать эффективное воздействие на частицы разного размера.

Оптимальным диапазоном излучения для коагуляции является использование колебаний с частотой от 15 до 50 кГц. Более низкие частоты опасны для человеческого организма, а на высо-

ких частотах сложно получить акустические колебания высокой интенсивности.

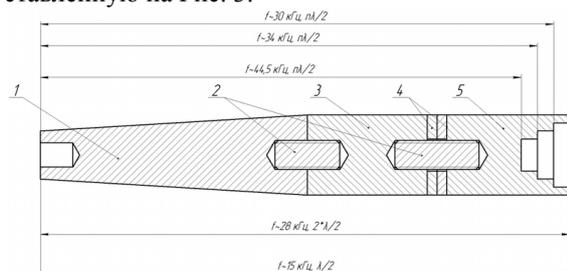
**ТАБЛИЦА I**  
**ЧАСТОТЫ И ПОЛОВИНЫ ПРОДОЛЬНЫХ ДЛИН ВОЛН ( $\lambda/2$ ), ПЕРВЫХ 14-ТИ ГАРМОНИК ДИСКОВОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ ДИАМЕТРОМ 420 ММ**

Номер гармоники	Частота, Гц	$\lambda/2$ , м
1	549,57	4,539
2	1991,4	1,253
3	4134,5	0,603
4	7567,5	0,330
5	11460	0,218
6	15220	0,164
7	23233	0,107
8	28637	0,087
9	34013	0,073
10	38022	0,066
11	44537	0,056
12	51177	0,049
13	57266	0,044
14	64830	0,038

### V. РАЗРАБОТКА УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Для создания установки коагуляции частиц разного размера необходимо возбуждение дискового излучателя продольными колебаниями на нескольких собственных частотах. Используемые для этих целей одно-, двух- и трехполуволновые колебательные системы позволяют возбудить диск только на одной частоте. Объясняется это тем, что скорости распространения изгибных и продольных колебаний существенно различаются.

Для создания многочастотного излучателя предложено использовать конструкцию, представленную на Рис. 3.



1 – концентратор, 2 – шпилька, 3 – частотопонижающая излучающая накладка, 4 – пьезокерамический элемент, 5 – частотопонижающая отражающая накладка.

Рис. 3 – Многочастотная ультразвуковая колебательная система

Конструкция представляет собой преобразователь Ланжевена с коническим концентратором. Форма концентратора обеспечивает наилучшее согласование составных частей излучателя. УЗКС имеет первую резонансную частоту 15 кГц. Вторая резонансная частота равна 28 кГц. Система так же имеет резонансы на 23, 30, 34, 40 и 44,5 кГц.

Объединив предложенную колебательную систему с дисковым излучателем, получим многочастотный излучатель для высокоинтенсивного воздействия на газовые среды (Рис. 4).

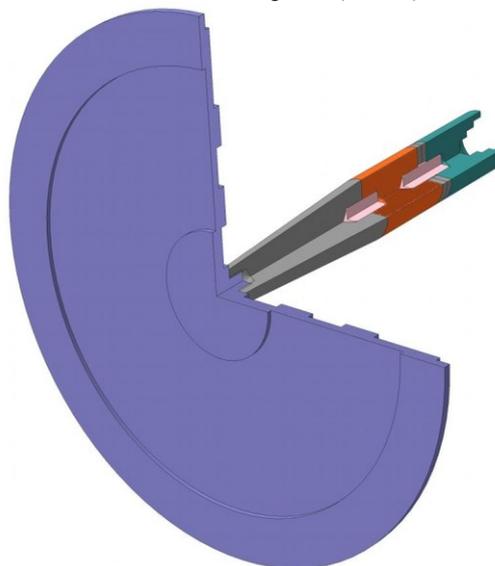


Рис. 4 – Многочастотный излучатель для высокоинтенсивного воздействия на газовые среды

Амплитудно-частотные характеристики излучателя и УЗКС представлены на Рис. 5.

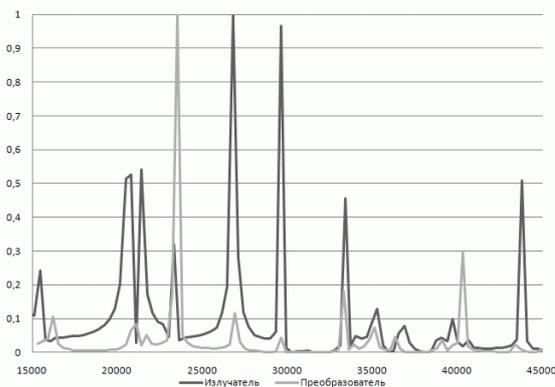


Рис. 5 – Амплитудно-частотная характеристика УЗКС без дискового излучателя и УЗКС с дисковым излучателем

Они подтверждают многорезонансный характер ультразвуковой колебательной системы.

### VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в результате проведенных работ предложена конструкция многочастотной ультразвуковой пьезоэлектрической колебательной системы, позволяющей совместно с дисковым излучателем создавать акустические колебания в диапазоне частот от 15 до 45 кГц, что является достаточным условием для коагуляции частиц размером более 0,4 мкм. Предложенная конструкция может найти применение в системах очистки промышленных выбросов, в системах вентиляции жилых помещений для предот-

вращения террористических атак с использованием химического и биологического оружия, в системах обеспечения безопасности производств, связанных с возможностью взрыва пыли.

#### VI. БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации для поддержки молодых российских ученых - кандидатов наук и их научных руководителей № МК-383.2008.8.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Поражающее действие и классификация боевых токсичных химических веществ [Электронный ресурс]// Информационный сайт о радиационной, химической, биологической защите - Режим доступа: <http://www.rhbz.info/rhbz3.1.2.html>
- [2] Miller, J. D. Защита приточного воздуха от заражения химическими и биологическими агентами [Текст] / J. D. Miller, "АВОК" 2003, №3
- [3] Юдаев Б.Ф. Акустическая коагуляция аэрозолей. Бюллетень строительной техники, 2004, №6
- [4] Страус, В. Промышленная очистка газов [Текст] / В. Страус; пер. с англ. изд. Ю.А. Косого - М.: Химия, 1981. - 616 с.
- [5] Ландау Л.Д. Теоретическая физика [Текст] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М., том VII, Теория упругости - М.: Наука, 1987. - 248 с.
- [6] Ultrasonic Oscillating System for Radiators of Gas Media [Text] / A.N. Lebedev; A.V. Shalunov; S.S. Khmelev; N.V. Kuchin; A.V. Shalunova //International Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2008: Workshop Proceedings. - Novosibirsk: NSTU, 2008.



**Владимир Н. Хмелев (М'00, SM'04)**— заместитель директора Бийского технологического института по НИР, профессор, доктор технических наук. Заслуженный изобретатель России. Лауреат премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники для молодых ученых. Область научных интересов – ультразвуковая техника и технологии, применение ультразвуковых колебаний высокой интенсивности для интенсификации технологических процессов и изменения свойств веществ и материалов.



**Андрей Н. Лебедев (S'03)** – инженер БТИ. В 2006 закончил БТИ по специальности «Информационно-измерительная техника и технологии». Область научных интересов: разработка новых типов ультразвуковых колебательных систем.



**Сергей Н. Цыганок** родился в Новосибирске, Россия, 1975. Кандидат технических наук, доцент. Лауреат премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники для молодых ученых. Областью научных интересов является разработка высокоэффективных пьезоэлектрических колебательных систем для ультразвуковых технологических аппаратов.



**Андрей В. Шалунов** родился в Бийске, Россия, 1980. Кандидат технических наук. Лауреат премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники для молодых ученых. Область научных интересов – разработка программного обеспечения для ультразвуковых технологических аппаратов.

**Антон Н. Галахов** родился в 1987 году, в г. Бийске. Студент 5-го курса БТИ.



**Ксения В. Шалунова** родилась в Бийске, Россия, 1986. Окончила факультет «Информационных технологий, автоматизации и управления» Бийского технологического института в 2008. Она является аспирантом первого года обучения кафедры «Методов, средств измерения и автоматизации». Областью ее научных интересов является изучение процессов и разработка оборудования для ультразвуковой коагуляции и осаждения аэрозолей различного происхождения.