

## АКУСТИЧЕСКАЯ КОАГУЛЯЦИЯ АЭРОЗОЛЕЙ

В.Н. ХМЕЛЕВ, А.В. ШАЛУНОВ, Р.В. БАРСУКОВ, С.Н. ЦЫГАНОВ, Д.С. АБРАМЕНКО  
Бийский технологический институт (филиал) государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»

**Современные тенденции развития общества, связанные с большим распространением потенциально опасных производств и постоянно возникающей угрозой террористических актов связанных с распылением ядовитых веществ в местах проживания и массового скопления людей, диктует необходимость создания устройств эффективного подавления аэрозолей. Предлагаемая вашему вниманию статья посвящена созданию подобных устройств.**

Аэрозоли – дисперсные системы с газообразной дисперсионной средой и твердой (дым, пыль) или жидкой (туман) дисперсной фазой. По происхождению различают диспергированные (техногенные) и конденсационные аэрозоли. Конденсационные аэрозоли образуются при объемной конденсации паров – это природные туманы, облака, а также аэрозоли, возникающие над сильно нагретыми телами в результате испарения из них (например, почвы) влаги и последующего охлаждения паров при перемешивании с более холодным воздухом.

Источниками природных аэрозолей являются землетрясения, извержения вулканов, метеоритная и космическая пыль. Источниками техногенных аэрозолей могут быть различные аварии, вредные выбросы предприятий, атаки террористов, направленные на биологическое или химическое поражение людей в местах массового скопления.

В связи с широким распространением потенциально опасных производств (выбросы аэрозолей ядовитых веществ) и резко возросшей опасностью проведения террористических актов с распылением химического или биологического поражающего вещества, возникает необходимость в создании эффективных средств подавления аэрозолей.

В настоящее время, для улавливания частиц дисперсной фазы аэрозоля используются традиционные пылеулавливатели, пылевые камеры для выделения крупных пылинок, инерционные, батарейные, жалюзийные и мокрые циклоны, в том числе электрофильтры, тканевые фильтры. Все эти устройства не пригодны для скоростного подавления аэрозолей, особенно в закрытых объемах

(воздуховодах) и на открытых пространствах, в частности для осаждения тумана на взлетно-посадочных полосах аэродромов и при движении морских судов в тумане.

Поэтому возникает необходимость в создании способа и устройств эффективной защиты помещений и открытых пространств от распыленных аэрозолей. Одним из способов, позволяющих решить поставленную задачу, является акустическая коагуляция. Однако, на сегодняшний день, практически отсутствуют устройства акустической коагуляции аэрозолей. При этом частота акустических волн должна лежать в области ультразвука, т.е. выше предела слышимости человека и, следовательно, не оказывать вредного воздействия на его организм.

Если распределение частиц аэрозоля полидисперсное, а относительная скорость частиц в акустическом поле зависит от их плотности и диаметра, частоты и интенсивности излучения, то и характеристики акустического поля должны соответствовать свойствам частиц. Что касается интенсивности излучения, то чем больше интенсивность звука, тем выше относительная скорость движения частиц аэрозоля [1]. Важным параметром аэрозоля характеризующим эффективность его коагуляции является характеристическая частота, определяемая как:

$$F_0 = \frac{3m}{2\pi R^2}, \quad (1)$$

где  $m$  – коэффициент динамической вязкости дисперсионной среды,  $\rho$  – плотность дисперсной фазы/частиц,  $R$  – радиус частицы.

При этом, отношение амплитуды скорости колебаний взвешенной частицы к амплитуде скорости колебаний дисперсионной среды в зависимости от отношения частоты  $f$  излучения звука к характеристической частоте  $F_0$  имеет асимптотический характер.

Например, для воздуха, при нормальных условиях

$$\frac{m}{\rho} = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}, \text{ поэтому}$$

$F_0 = \frac{7,2 \cdot 10^{-6}}{R^2}$ . Следовательно, для частиц радиусом 1 мкм –  $F_0 = 7,2$  МГц, для частиц с радиусом 100 мкм –  $F_0 = 0,72$  кГц, а для частиц с радиусом 10 мкм –  $F_0 = 72$  кГц. Если распределение частиц аэрозоля полидисперсное, то наличие характеристических частот обуславливает необходимость использования ультразвукового воздействия в широком диапазоне частот.

С увеличением частоты излучения амплитуда скорости легких частиц увеличивается, а амплитуда скорости тяжелых уменьшается. При очень высоких частотах, относительно характеристической  $F_0$ , амплитуда движения частиц уже не зависит от частоты, а определяется лишь отношением плотностей вещества частицы и окружающей среды.

Взаимодействие частиц (например, капель жидкости) с колеблющимся потоком газа приводит к нарушению их равномерного распределения в пространстве, сближению друг с другом и дальнейшей коагуляции. Неустойчивость равномерного распределения частиц обусловлена в основном двумя причинами.

Во-первых, локальное спонтанное увеличение концентрации частиц приводит к увеличению неустойчивости системы, так как в области с повышенной концентрацией частиц возрастает скорость газа (амплитуда скорости) и, следовательно, падает неоднородное давление. Это вызывает возрастание плотности частиц – реализуется бернуллевский механизм сближения частиц.

Во-вторых, в условиях стесненности частиц, сила Стокса увеличивается в области их повышенной концентрации, реализуется коллективное взаимодействие большого скопления частиц аэрозоля. Влияние этого механизма может стать более существенным, чем влияние механизма Бернулли. При высоких частотах нестабильность плотности обусловлена перепадом давления между областями с повышенными и пониженными концентрациями. При более низких частотах неустойчивость обусловлена как механизмом Бернулли, так и влиянием эффекта стесненности Стокса. Вторым, после частоты, действующим фактором коагуляции является интенсивность ультразвукового излучения  $I_n$ . На рисунке 1 представлены характерные зависимости степени осаждения  $n/n_0$  (где  $n$  – концентрация частиц за время облучения;  $n_0$  – концентрация частиц в начальный момент облучения) от времени облучения ультразвуком и его интенсивности для тумана хлористого аммония.

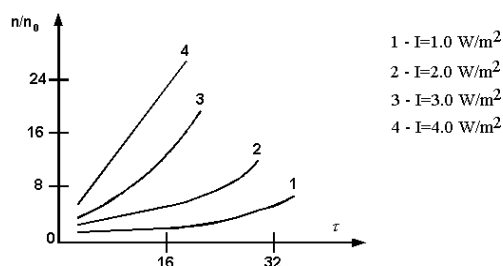


Рис. 1. Зависимости степени осаждения от времени облучения ультразвуком и его интенсивности для тумана хлористого аммония

Приведенные зависимости свидетельствуют о том, что при больших интенсивностях ультразвука степень коагуляции за короткое время достигает более высокого значения [2]. На процесс коагуляции оказывают влияние также время экспозиции, которое зависит от  $I_n$  (при  $I_n=4,0$  Вт/м² весь процесс протекает в течение нескольких секунд), и исходной концентрации аэрозоля (с увеличением начальной концентрации эффективность коагуляции возрастает). Увеличение ультразвукового давления  $P_{зв}$  (интенсивности) резко снижает время осаждения  $t$  (рисунок 2).

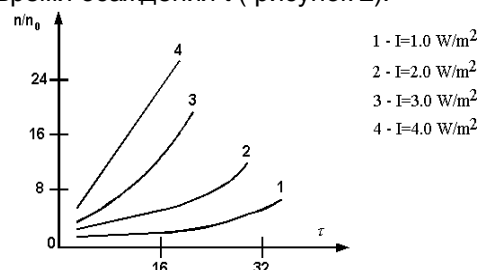


Рис. 2. Зависимость постоянной времени коагуляции от звукового давления

В настоящее время для коагуляции аэрозолей используются аэродинамические излучатели, в которых происходит преобразование кинетической энергии газового потока в энергию акустических колебаний. К таким излучателям относятся вихревые свистки, свистки с тангенциальным движением струи газа вблизи щели объемного резонатора, клапанные акустические генераторы, газоструйные излучатели Гартмана и его модификации.

Недостатками подобных излучателей является необходимость использования и большой расход сжатого воздуха, низкий КПД, быстрый износ механических узлов абразивными частицами сжатого газа, ограниченный диапазон излучения. Существенным недостатком газоструйных излучателей является длительное время выхода на режим излучения, связанное с необходимостью создания

потока газа, а в случае использования пиропатрона – 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 динамическим и статическим 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, основу аппарата для эффективной коагуляции аэрозолей, как в замкнутых так и на открытых пространствах, могут составлять излучатели, в которых обеспечивается преобразование энергии продольных колебаний пьезоэлектрического преобразователя в изгибные колебания титановых пластин или дисков. Преимуществами излучателей дискового типа являются возможность формирования ультразвуковых колебаний большой мощности и обеспечения перестройки частоты излучения за счет перехода с одной гармоники на другую. Смена рабочей частоты может быть вызвана необходимостью воздействия на частицы аэрозоля разных размеров (в случае осаждения полидисперсного аэрозоля).

Как указывалось выше, осаждение частиц разных размеров происходит при разной частоте колебаний: чем меньше размеры коагулируемых частиц, тем выше требуемая частота. Дисковый излучатель может иметь первую гармонику в герцовом диапазоне, а, например, пятую гармонику на частоте около и более 20 кГц. Таким образом, дисковый излучатель может использоваться в широком диапазоне частот и оказывать эффективное воздействие на частицы разного размера. На рисунке 3 показано распределение амплитуд колебаний на первой гармонике дискового излучателя диаметром 340 мм. Резонансная частота излучателя равна 300 Гц.

На рисунке 4 показано распределение амплитуд колебаний на пятой гармонике дискового излучателя. Частота излучения диска равна 20 кГц.

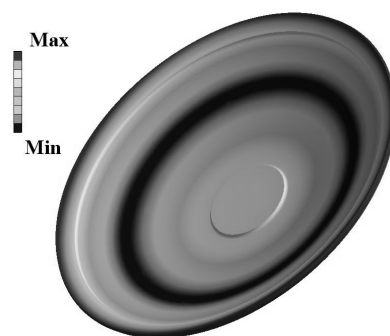


Рис. 3. Распределение амплитуд колебаний дискового излучателя на первой гармонике

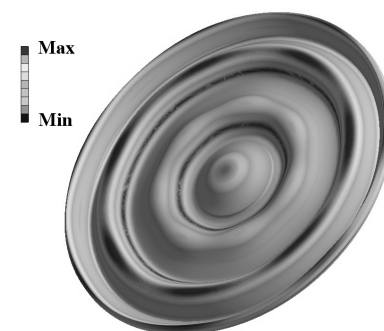
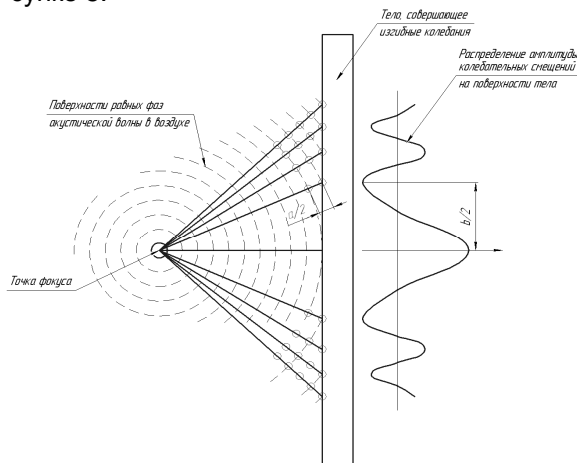


Рис. 4. Распределение амплитуд колебаний дискового излучателя на пятой гармонике

Одним из известных способов создания в воздушной среде акустических колебаний с уровнем звукового давления более 130-140 дБ, при использовании пьезоэлектрических излучателей, является фокусировка (концентрирование) менее интенсивных колебаний на локализованном участке. Принцип работы такого излучателя показан на рисунке 5.



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

Рис. 5. Схематичное изображение, поясняющее принцип работы фазированного фокусирующего излучателя

У фокусирующего излучателя поверхность твердого тела (пластины) совершает изгибные колебания, причем распределение 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 равных [3]:

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

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

$$Y_- = \sqrt{naL + \frac{n^2 a^2}{4}}, \quad (3)$$

где  $n=1,3,5,\dots$ , то волны, излучаемые каждой точкой пластины, будут приходить в фокус в одной фазе.

Уровень звукового давления в фокусе превышает 160 дБ, а вокруг фокуса образуются поверхности равных фаз, где уровень давления превышает 150 дБ.

Внешний вид излучателя, работающего по описанному принципу, показан на рисунке 6.



1 – диск; 2 – фазовыравнивающие канавки; 3 – колебательная система

Рис. 6. Фокусирующий пьезоэлектрический излучатель

Излучающая поверхность диска 1 является плоской, а на обратной стороне диска имеются кольцевые канавки 2, обеспечивающие необходимое распределение изгибных колебаний по поверхности диска, а выступы,

расположенные между канавками являются ребрами жесткости. Возбуждение диска осуществляется полуволновой пьезоэлектрической системой, совершающей продольные колебания. Применение фокусирующего излучателя целесообразно в случае, источник распространения аэрозоля известен и имеется возможность подавления аэрозоля в момент зарождения.

Для осуществления акустической коагуляции аэрозолей (подавления заражения и загрязнения) на открытых пространствах (аэродромы, производственные помещения, места общественного пользования), представляют интерес излучатели, создающие в воздушной среде акустическую волну, близкую к плоской, способную распространяться на значительные расстояния. При центральном возбуждении плоского тонкого диска, радиус которого кратен половине длины изгибной волны в этом материале, распределение колебательных смещений вдоль поверхности диска будет иметь вид стоячих волн. При этом амплитуда колебаний точки поверхности диска, удаленной на расстояние  $r$  от его центра определяется выражением:

$$A(r) = A_0 \cdot \cos\left(2p \cdot \frac{k \cdot r}{R}\right), \quad (4)$$

где  $A_0$  – амплитуда колебаний в центре диска;  $k$  – целое число полуволн колебаний, укладывающихся на радиусе диска;  $R$  – радиус диска.

На рисунке 7 представлено распределение изгибных колебаний по поверхности плоского диска и излучение отдельных точек поверхности диска в воздух.

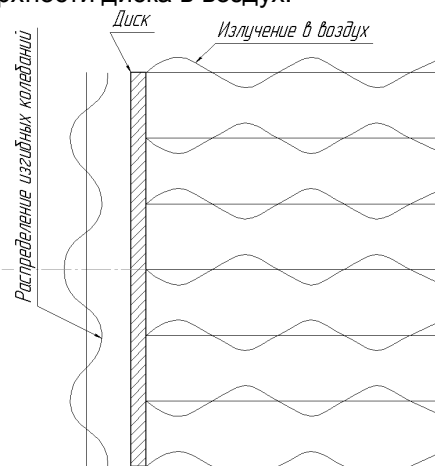


Рис. 7. Примерное распределение изгибных колебаний по поверхности плоского диска и излучение отдельных точек поверхности диска в воздух

Из рисунка видно, что различные точки поверхности излучают колебания в противоположенных фазах, что приводит к тому, что на некотором расстоянии от диска происходит взаимная компенсация излучения. Для того чтобы исключить это, можно искусственно снизить амплитуду колебаний участков диска, излучающих колебания в одной из фаз, например в «отрицательной» фазе. Этого можно добиться, увеличив толщину диска в указанных участках. В результате получается диск ступенчато-переменного сечения, схема которого представлена на рисунке 8 (условно показан диск с полуволновой УЗКС).

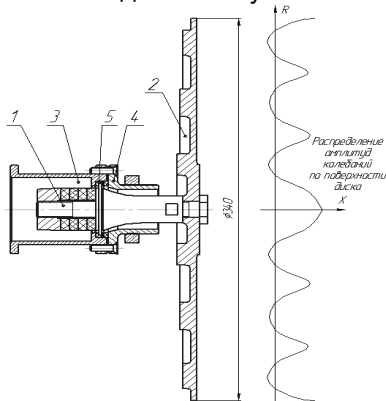


Рис. 8. Диск ступенчато-переменного сечения с преимущественным излучением одной фазы колебаний

Здесь же показано распределение амплитуд изгибных колебаний по поверхности диска. Из 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:

$$S_{эф} = \frac{1}{A_0} \int_0^R 2\pi r \cdot A(r) \cdot dr, \quad (5)$$

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

За счет выполнения на тыльной поверхности диска выступов, расположенных в зо-

нах «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.

Если высоту выступов, расположенных в зонах «отрицательных» фаз диска ступенчато-переменного сечения сделать равной половине длины волны, то излучение «положительных» и «отрицательных» зон будут уже не вычитаться, а складываться. При этом, фаза излучения всех точек поверхности выравнивается. Схема такого излучателя показана на рисунке 9.

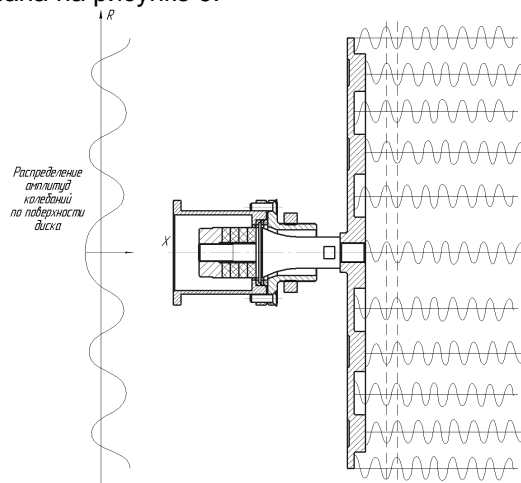


Рис. 9. Схема излучателя с фазовыравнивающими элементами

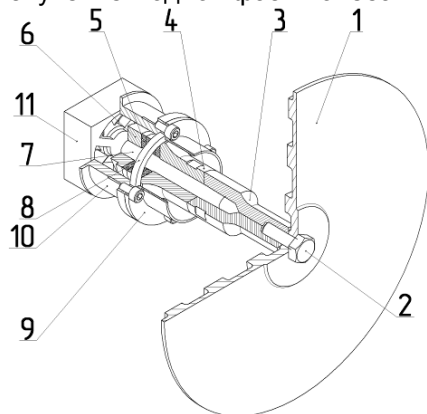
Как следует из рисунка, выступы располагаются не на тыльной поверхности диска (как в случае с излучателем с преимущественным излучением одной фазы), а на фронтальной (излучающей). В связи с тем, что излучение «положительных» и «отрицательных» зон в такой конструкции уже не компенсируют, а дополняют друг 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 утолщенных участков. Эффективная площадь излучения диска определяется выражением:

$$S_{эф} \approx 0,7S, \quad (6)$$

где  $S$  – общая площадь излучающей поверхности.

Интенсивность колебаний, создаваемых таким излучателем диаметром 340 мм на расстоянии 3–4 м, составляет 147–152 дБ [4]. Таким образом, излучатель с фазовыравнивающими элементами способен обеспечить наилучшие характеристики акустического поля по сравнению с излучателем с преимущественным излучением одной фазы. На рисунке 10 показана конструкция излучателя, включающего в себя полуволновую одноэлементную УЗКС с полуволновым концентратором и излучающий диск, с преимущественным излучением одной фазы колебаний.



1 – излучающий диск; 2 – болт; 3 – дополнительный концентратор; 4 – основной концентратор; 5 – пьезоэлектрические элементы; 6 – задняя частотопонижающая накладка; 7 – шпилька; 8 – кольцо акустической развязки; 9 – фланец корпуса; 10 – корпус; 11 – вентилятор

Рис. 10. Конструктивное исполнение излучателя ультразвуковой колебательной системы

Акустическая связь внутри ультразвуковой колебательной системы обеспечивается за счет того, что основной концентратор 4 и пьезоэлектрические элементы 5 зажаты между дополнительным концентратором 3 и задней частотопонижающей накладкой 6 с силой, многократно превышающей величину знакопеременной силы, создаваемой пьезоэлектрическими элементами. Стягивающее усилие обеспечивается шпилькой 7. Акустическая связь дополнительного концентратора 3 и диска 1 обеспечивается за счет болта 2, ввернутого в резьбовое отверстие в дополнительном концентраторе. В корпусе колебательной системы закрепляется через кольцо акустической развязки 8, зажатое в зазоре между фланцем 9 и корпусом 10. Охлаждение пьезоэлементов осуществляется воздушным потоком от вентилятора 11. Предельная входная электрическая мощность такой конструкции составляет 350 Вт.

На рисунках 11 и 12 приведены полученные диаграммы направленности для излучателей с фазовыравнивающими элементами колеблющихся на первой и пятой гармониках, соответственно.

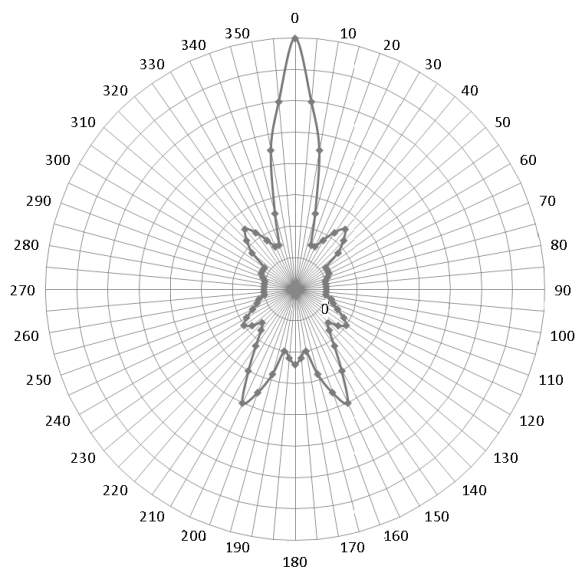


Рис. 11. Диаграмма направленности для дискового излучателя на первой гармонике

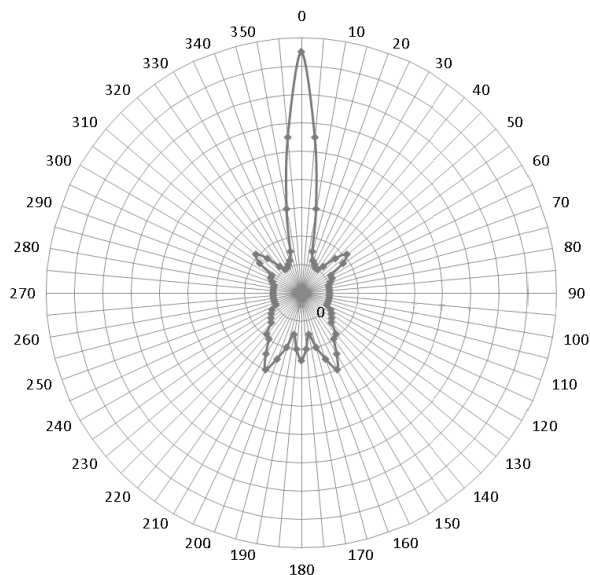


Рис. 12. Диаграмма направленности для дискового излучателя на пятой гармонике

Из представленных диаграмм следует, что при формировании колебаний, соответствующих высшим гармоникам, излучатель имеет меньшую ширину диаграммы направленности. Это может быть объяснено тем, что ширина диаграммы направленности есть величина, обратно пропорциональная волновым размерам излучателя, которые при ра-

боте на высших гармониках значительно увеличиваются.

Этот факт следует учитывать при практическом применении разработанных излучателей. Так, при необходимости эффективной коагуляции аэрозоля в протяженных замкнутых каналах (например, в вентиляционных шахтах) наиболее целесообразно использовать излучатели, работающие на высших гармониках. При этом, благодаря узкой диаграмме направленности, исключаются непроизводительные потери ультразвуковой энергии связанные с ее рассеянием и многократным отражением от стенок канала.

К случае коагуляции аэрозолей на открытых площадках (взлетно-посадочные полосы, автомагистрали, производственные помещения и другие места, где возможно исключить непосредственное воздействие высоко интенсивных акустических колебаний звукового диапазона на человека) наиболее эффективным будет использование низших гармоник излучателя, обеспечивающих более широкий сектор одновременной коагуляции аэрозоля (согласно диаграммы направленности до  $\sim 20$  град. по уровню 0,707).

У разработанных излучателей присутствует излучение в тыльную сторону, диаграмма направленности которого характеризуется двумя максимумами, симметрично расположенными относительно главной акустической оси излучателя. Полученная форма диаграммы направленности и, значительно меньшая интенсивность излучения в тыльную сторону могут быть объяснены экранированием ультразвукового излучения корпусом УЗКС и отсутствием на тыльной поверхности фазовыравнивающих элементов. При необходимости, это излучение может экранироваться или использоваться как дополнительный энергетический фактор, способствующий коагуляции аэрозоля.

Для проверки эффективности разработанного фокусирующего дискового излучателя был проведен эксперимент по подавлению высококонцентрированного аэрозоля в замкнутом пространстве (колба диаметром 150 мм) в котором находился источник жидкостного аэрозоля (ультразвуковой медицинский ингалятор) с размером капель  $1...5$  мкм (капли этого размера наиболее легко принимают в альвеолы легких). Начальная концентрация аэрозоля составляла  $10 \text{ мл/м}^3$ . На рисунке 13 а и 13 б показаны фотографии, иллюстрирующие изменение концентрации аэрозоля до и после ультразвукового воздействия.

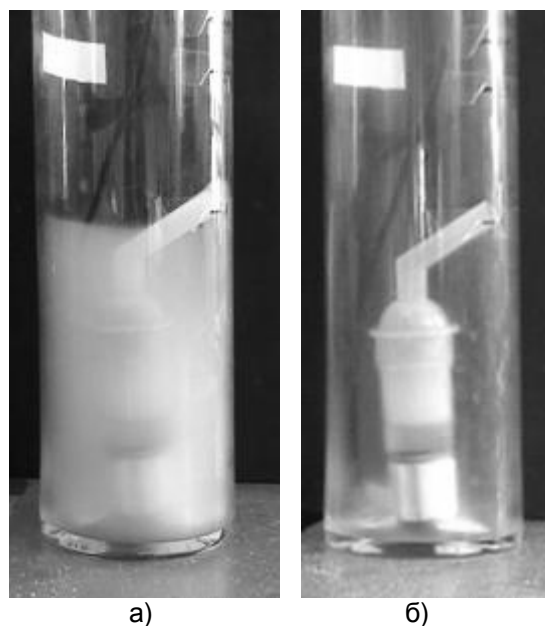
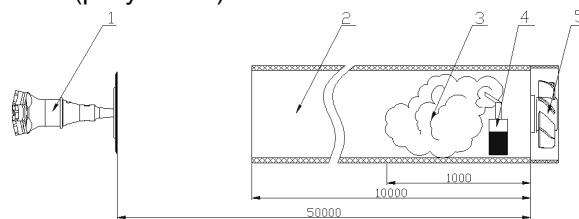


Рис. 13. Ультразвуковая коагуляция аэрозоля

Конечная концентрация аэрозоля не превышала  $0,1 \text{ мл/м}^3$ . Время ультразвукового воздействия составило  $1...2$  сек. Был проведен ряд экспериментов, при которых начальная концентрация аэрозоля изменялась от  $1 \text{ мл/м}^3$  до  $50 \text{ мл/м}^3$ . Во всех случаях, время ультразвукового воздействия, необходимое для коагуляции аэрозоля, не превышало 2 сек.

Показателем эффективности разработанных дисковых излучателей с фазовыравнивающими элементами могут служить результаты экспериментов по коагуляции аэрозоля, распространяющегося по коробу с поперечным сечением  $300 \times 300$  мм, и длиной 10 м (рисунок 14).



1 – дисковый излучатель; 2 – короб; 3 – аэрозоль; 4 – источник аэрозоля; 5 – вентилятор

Рис. 14. Схема проведения эксперимента

Первоначально в коробе формируется локальное облако аэрозоля (размер частиц  $1...5$  мкм) протяженностью ( $L$ ) около 1 м и концентрацией ( $C$ )  $10 \text{ мл/м}^3$ , равномерной вдоль всего облака (вентилятор отключен). После ультразвукового воздействия с расстояния

50 м в течение 10 сек. распределение концентрации аэрозоля приняло вид, показанный на рисунке 15 (в процентах от исходной концентрации). Таким образом, аэрозоль был полностью коагулирован (>99%).

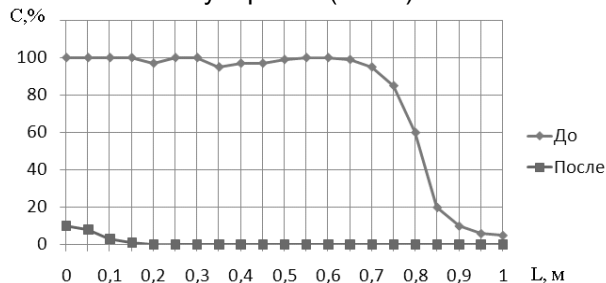


Рис. 15. Распределение концентрации аэрозоля до и после УЗ воздействия

Для проверки эффективности коагуляции аэрозоля при его перемещении по воздуховоду вместе с воздушными потоками, на одном из концов воздуховода был установлен вентилятор обеспечивающий расход воздуха до 2 м<sup>3</sup>/мин. При этом распределение концентрации аэрозоля вдоль короба приняло вид, показанный на рисунке 16 (верхняя кривая).

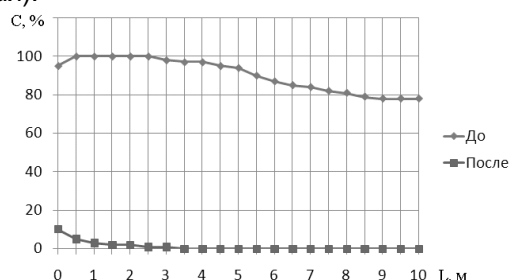


Рис. 16. Распределение концентрации аэрозоля при его распространении по коробу

После 10 секундного ультразвукового воздействия с расстояния 50 м аэрозоль в коробе практически полностью коагулировал, за исключением незначительной концентрации в области его источника, как показано на рисунке 16 (нижняя кривая).

Таким образом, на расстоянии 10 м от источника (на выходе из короба) аэрозоль обнаружен не был, а на расстоянии менее 3 м концентрация аэрозоля не превышала 1% от его начальной концентрации.

На основе разработанных конструкций ультразвуковых колебательных систем и дисковых излучателей были созданы ультразвуковые аппараты для коагуляции опасных аэрозолей с целью предупреждения чрезвычайных ситуаций.

Аппарат, показанный на рисунке 17, предназначен фокусированного воздействия на газовые среды высокоинтенсивными аку-

стическими колебаниями (более 160 дБ). Аппарат может использоваться для локального сверхвысокоскоростного подавления аэрозолей локализованных в замкнутых пространствах (например, системы вентиляции зданий).



Рис. 17. Ультразвуковой аппарат для фокусированного высокоамплитудного осаждения аэрозолей

В состав аппарата входит ультразвуковая пьезоэлектрическая колебательная система в корпусе с дисковым излучателем, генератор электрических колебаний ультразвуковой частоты с регулируемой выходной мощностью.

Таблица 1. Технические характеристики аппарата

Частота излучения, кГц	0,3...22
Диаметр излучателя, м	0,34
Интенсивность колебаний, дБ не менее	160
Потребляемая мощность, ВА, не более	300
Масса колебательной системы с излучателем, кг, не более	6

На рисунке 18 показан ультразвуковой аппарат, который может использоваться для осаждения аэрозолей как техногенного, так и природного (туманы) характера на открытых пространствах (например, аэродромах).



Рис. 18. Ультразвуковое оборудование для осаждения аэрозолей на открытых пространствах



Таблица 2. Технические характеристики оборудования

Частота излучения, кГц	0.3...22
Диаметр излучателя, м	0,34
Интенсивность колебаний, дБ не менее	150
Потребляемая мощность, ВА, не более	450
Масса колебательной системы с излучателем, кг, не более	7

На основе проведенного анализа принципов функционирования и технических характеристик устройств, предназначенных для генерации ультразвуковых колебаний в воздушной среде установлена принципиальная невозможность их применения для эффективной коагуляции аэрозолей. Показано, что наиболее эффективно коагуляция аэрозолей может осуществляться при помощи широкополосных (многорезонансных) ультразвуковых излучателей на основе дискового излучающего элемента большой площади (0,1 м<sup>2</sup> и более) и пьезоэлектрического преобразователя с концентратором. Практически разработаны конструкции фокусирующих и нефокусирующих излучателей, способных работать как на открытых, так и в замкнутых пространствах при уровне ультразвукового воздействия до 160 дБ.

Результаты экспериментальных исследований подтвердили высокую эффективность разработанных излучателей, способную обеспечивать малое время коагуляции, практически полное отсутствие аэрозоля в воздушной среде после ультразвукового воздействия. Показана возможность коагуляции наиболее опасных высокодисперсных аэрозолей с размером частиц менее 5 мкм.

Для питания созданных излучателей разработаны специализированные ультразвуковые генераторы мощностью 300 ВА и 450 ВА с возможностью внешнего управления по последовательному интерфейсу, позволяющему объединять излучатели и генераторы в единую систему в пределах некоторого объекта.

Работа выполнена при поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук № МК-383.2008.8.

#### Литература

1. Юдаев Б.Ф. Акустическая коагуляция аэрозолей. Бюллетень строительной техники,

2004, №6.

2. Мощные ультразвуковые поля. Под ред. Л. Д. Розенберга. М., Наука, 1968.

3. 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", Intrnational 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, D. V. Genne, A. N. Lebedev "Research of Ultrasonic Drying Process in Dryers of Ventilation Type" Intrnational Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2007: Workshop Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2007.