

Комплекс Оборудования Для Акустической Коагуляции Аэрозолей

Владимир Н. Хмелёв, д.т.н., *Member IEEE*, Андрей В. Шалунов, к.т.н., Шалунова К.В.

Бийский технологический институт (филиал)

ГОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»

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

Ключевые слова – Коагуляция, ультразвук, аэрозоль, излучатели для газовых сред, дисковый излучатель, УЗКС, эффективная площадь, антитеррор.

I. ВВЕДЕНИЕ

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 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 опасности 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 преимущественно традиционные пылеулавливатели

пылевые камеры для выделения крупных пылинок, инерционные, батарейные, жалюзийные и мокрые циклоны, в том числе скоростные, электрофильтры, тканевые фильтры. Все эти устройства не пригодны для скоростного подавления аэрозолей особенно 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 для эффективной очистки помещений и открытых пространств от распыленных в них аэрозолей. Эффективным способом позволяющим решить поставленную задачу является акустическая коагуляция. Однако на сегодняшний день практически отсутствуют устройства, позволяющие эффективно осуществить процесс акустической коагуляции аэрозолей. При этом частота акустических волн должна лежать выше предела слышимости человека и, следовательно, не оказывать вредного воздействия на его организм.

Созданию устройств способных осуществлять эффективную коагуляцию техногенных и природных аэрозолей посвящена данная статья.

II. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ АКУСТИЧЕСКОЙ КОАГУЛЯЦИИ

Степень разделения аэрозолей на дисперсную фазу и дисперсионную среду уменьшается с возрастанием дисперсности частиц аэрозолей. С целью увеличения степени разделения аэрозолей прибегают к агломерации или коагуляции частиц в акустическом поле большой интенсивности. Под действием акустических волн частицы движутся с большими скоростями относительно друг друга, повышается вероятность числа соударений частиц аэрозоля и происходит их коагуляция до размеров, при которых они осаждаются.

Частицы аэрозоля или капельки тумана – это полидисперсный аэрозоль, у которого функция распределения частиц по размерам имеет логнормальный вид. Если частицы аэрозоля полидисперсные, 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. Отношение амплитуды скорости колебаний взвешенной частицы к амплитуде скорости колебаний дисперсионной среды в зависимости от отношения частоты f излучения звука к характеристической частоте [1]:

$$F_0 = \frac{3\mu}{2\pi\rho R^2},$$

где μ – коэффициент динамической вязкости дисперсионной среды, ρ – плотность дисперсионной фазы/частиц, R – радиус частицы); при различных плотностях частиц носит асимптотический характер.

Например, для воздуха при нормальных условиях $\frac{\mu}{\rho} = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$, поэтому

$F_0 = \frac{7,2 \cdot 10^{-6}}{R^2}$. Следовательно, для частиц радиусом 1 мкм $F_0 = 7,2 \text{ МГц}$, для частиц с радиусом 100 мкм $F_0 = 0,72 \text{ кГц}$, а для частиц с радиусом 10 мкм $F_0 = 72 \text{ кГц}$. Если частицы аэрозоля полидисперсные, то их характеристическая частота должна иметь еще большую (R^2) характеристическую полосу воздействия.

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, что вызывает возрастание плотности частиц – бернуллевский механизм сближения частиц

Во-вторых, при некоторых условиях начинает проявляться влияние стоковского механизма, суть которого в том, что в условиях стесненно-

сти частиц сила Стокса увеличивается в области их повышенной концентрации – коллективное взаимодействие большого скопления частиц аэрозоля. Это влияние может стать более существенным, чем механизм Бернулли.

При высоких частотах неустойчивость плотности обусловлена перепадом давления между областями с повышенными и пониженными концентрациями. При более низких частотах неустойчивость обусловлена как механизмом Бернулли, так и эффектом стесненности Стокса.

Вторым, после частоты, действующим фактором является интенсивность ультразвукового излучения I_n . На рис. 1 представлены графики 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.

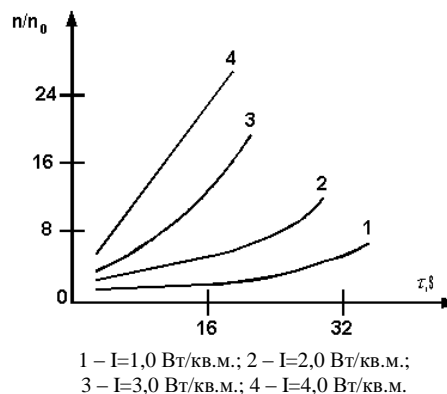


Рис. 1. Зависимости степени осаждения n/n_0 от времени облучения ультразвуком и его интенсивности для тумана хлористого аммония

Видно, что при больших интенсивностях ультразвука степень коагуляции за короткое время достигает высокого значения [2].

На процесс коагуляции оказывают влияние также время экспозиции, которое зависит от I_n (при $I_n=1,0 \text{ Вт/кв.м.}$ весь процесс протекает в течение нескольких секунд), и исходной концентрации аэрозоля (с увеличением концентрации эффективность коагуляции возрастает).

Увеличение ультразвукового давления $P_{зв}$ резко снижает время осаждения t (рис. 2).

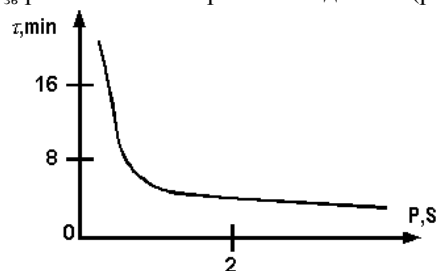


Рис. 2. Зависимость постоянной времени коагуляции от звукового давления

III. РАЗРАБОТКА ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ АКУСТИЧЕСКОЙ КОАГУЛЯЦИИ АЭРОЗОЛЕЙ

На сегодняшний день в качестве источников звука в газе используются генераторы для газовых сред, в которых происходит преобразование кинетической энергии газового потока в акустическую. К таким излучателям относят вихревые свистки, свистки с тангенциальным движением струи газа вблизи щели объемного резонатора, клапанные акустические генераторы, генератор Гартмана и его модификации.

Недостатками подобных излучателей является необходимость использования и большой расход сжатого воздуха, низкий КПД, узкая диаграмма направленности, быстрый износ механических узлов. Так же существенным недостатком газоструйных излучателей является длительное время включения связанное с необходимостью создания потока газа за ограниченное время, а в случае использования пиропатрона – непродолжительное время работы.

Кроме того, как правило, эти источники излучения работают эффективно на резонансной частоте и для коагуляции полидисперсного аэрозоля менее эффективны, чем широкополосные излучатели.

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

Поэтому основу аппарата для эффективной коагуляции аэрозолей, как в замкнутых так и открытых пространствах должны составлять излучатели, в которых обеспечивается преобразование энергии продольных колебаний пьезоэлектрического преобразователя в изгибные колебания титановых пластин или дисков, сложной конфигурации. Одним из преимуществ излучателей дискового типа является возможность перестройки частоты излучения за счет перехода на работу с другой модой. 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 частицы, тем выше требуемая частота. Дисковый излучатель может иметь первую моду колебаний в герцовом диапазоне, а, например, пятую моду колебаний на частоте около 20 кГц. Таким образом, дисковый

излучатель может использоваться в широком диапазоне частот и оказывать эффективное воздействие на частицы разного размера.

На рис. 3 показано распределение амплитуд колебаний на первой моде колебаний дискового излучателя. Резонансная частота излучателя равна 300 Гц.

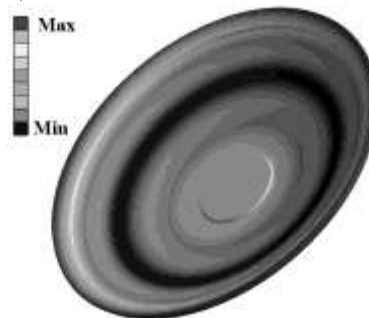


Рис. 3. Распределение амплитуд колебаний дискового излучателя на первой моде колебаний

На рис. 4 показано распределение амплитуд колебаний на пятой моде колебаний дискового излучателя. Резонансная частота диска равна 20 кГц.

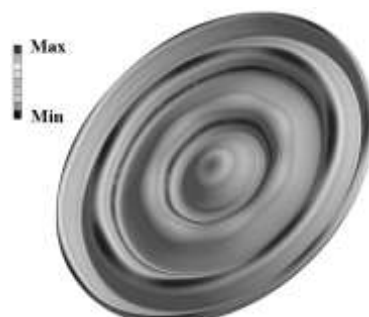


Рис. 4. Распределение амплитуд колебаний дискового излучателя на пятой моде колебаний

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 рис. 5.

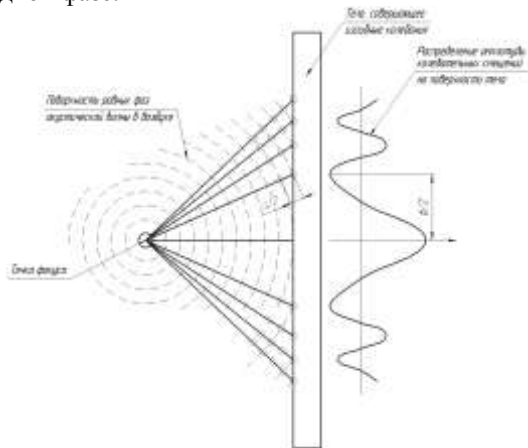
У такого излучателя поверхность твердого тела (пластины) совершает изгибные колебания, причем распределение амплитуд колебательных смещений вдоль радиуса пластины имеет вид стоячих волн. Каждая точка колеблющейся поверхности излучает в воздушную среду акустическую волну. Если за счет формы пластины расположить «положительные» максимумы колебательных смещений на расстояниях от центра пластины равных [3]:

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

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.



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

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

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 рис. 6. 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 системой.



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

Рис. 6. Фокусирующий пьезоэлектрический излучатель

Применение фокусирующего излучателя целесообразно в случае, источник распространения аэрозоля известен и имеется возможность его подавления в момент зарождения (например, вентиляционная система зданий).

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:

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

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

На рис. 7 представлено распределение изгибных колебаний по поверхности плоского диска и излучение отдельных точек поверхности диска в воздух. Из рис. 7 видно, что различные точки поверхности излучают колебания в противоположенных фазах, что приводит к тому, что на некотором расстоянии от диска происходит взаимная компенсация излучения.

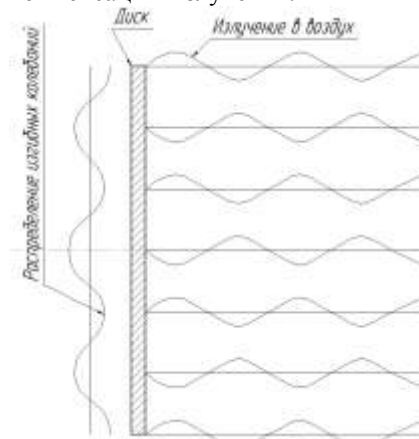


Рис. 7. Примерное распределение изгибных колебаний по поверхности плоского диска и излучение отдельных точек поверхности диска в воздух

Для того чтобы исключить этот фактор, 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 рис. 8 (условно показан диск с полуволновой УЗКС). 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.

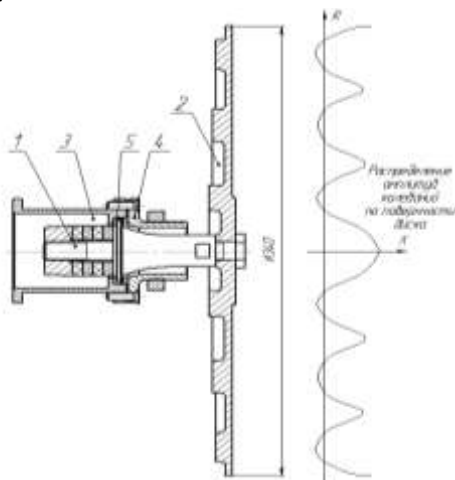


Рис. 8. Диск ступенчато-переменного сечения с преимущественным излучением одной фазы колебаний

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.

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.

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 рис. 9.

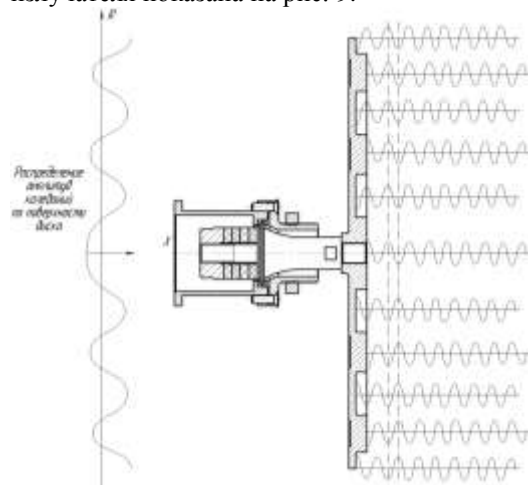


Рис. 9. Схема излучателя с фазовыравнивающими элементами

Как видно из рис. 9, 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:

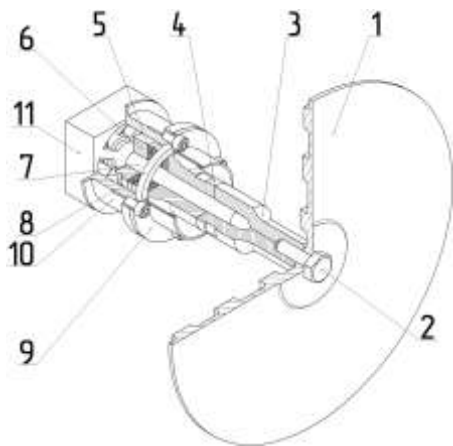
$$S_{\text{эф}} \approx 0,7 S ,$$

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 рис. 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 850 Вт.

IV. РАЗРАБОТАННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

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

Аппарат, показанный на рис. 11, предназначен для фокусированного воздействия на газовые среды высокоинтенсивными акустическими колебаниями (более 160 дБ). Аппарат может использоваться для локального сверхвысокоскоростного подавления аэрозолей локализованных в замкнутых пространствах (например системы вентиляции зданий).



Рис. 11. Ультразвуковой аппарат для фокусированного высокоамплитудного осаждения аэрозолей

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

ТАБЛИЦА I
ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АППАРАТА

Параметр	Значение
Частота излучения, кГц	0,3–22
Диаметр излучателя, м	0,34
Интенсивность колебаний, дБ не менее	160
Потребляемая мощность, Вт, не более	300
Масса колебательной системы с излучателем, кг, не более	6
Масса электронного блока, кг, не более	8

На рис. 12 показан ультразвуковой аппарат, который может использоваться для осаждения аэрозолей как техногенного, так и природного (туманы) характера на открытых пространствах (например, аэродромах).



Рис. 12. Ультразвуковое оборудование для осаждения аэрозолей на открытых пространствах

ТАБЛИЦА I
ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АППАРАТА

Параметр	Значение
Частота излучения, кГц	0,3–22
Диаметр излучателя, м	0,34
Интенсивность колебаний, дБ не менее	150
Потребляемая мощность, Вт, не более	450
Масса колебательной системы с излучателем, кг, не более	6
Масса электронного блока, кг, не более	8

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований были разработаны ультразвуковые аппараты для эффективного высокоинтенсивного осаждения аэрозолей различного происхождения, как в локализованных объемах, так и на открытых пространствах. В настоящее время, разработанное оборудование проходит стадию технических испытаний.

VI. БЛАГОДАРНОСТЬ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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