

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(19) **RU** ⁽¹¹⁾ **2 759 506** ⁽¹³⁾ **C1**

(51) МПК
[B01D 51/08 \(2006.01\)](#)
[B01J 19/10 \(2006.01\)](#)
(52) СПК
[B01D 51/08 \(2021.08\)](#)
[B01J 19/10 \(2021.08\)](#)

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

Статус: действует (последнее изменение статуса: 20.11.2021)
Пошлина: учтена за 3 год с 13.02.2023 по 12.02.2024. Установленный срок для уплаты пошлины за 4 год: с 13.02.2023 по 12.02.2024. При уплате пошлины за 4 год в дополнительный 6-месячный срок с 13.02.2024 по 12.08.2024 размер пошлины увеличивается на 50%.

(21)(22) Заявка: [2021103620](#), 12.02.2021(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
12.02.2021Дата регистрации:
15.11.2021Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: 12.02.2021(45) Опубликовано: [15.11.2021](#) Бюл. № [32](#)

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: RU 2447926 C2, 20.04.2012. RU 2725584 C1, 02.07.2020. RU 2374965 C1, 10.12.2009. RU 169753 U1, 31.03.2017. RU 102197 U1, 20.02.2011. JP 2505143 B2, 05.06.1996.

Адрес для переписки:
659305, Алтайский край, г. Бийск, ул.
Трофимова, 27, корп. Б, к. 101/1, Общество
с ограниченной ответственностью "Центр
ультразвуковых технологий АлтГТУ",
Хмелев Максим Владимирович

(72) Автор(ы):

**Боченков Александр Сергеевич (RU),
Голых Роман Николаевич (RU),
Нестеров Виктор Александрович (RU),
Тергишников Павел Павлович (RU),
Хмелёв Владимир Николаевич (RU),
Хмелёв Максим Владимирович (RU),
Цыганок Сергей Николаевич (RU),
Шалунов Андрей Викторович (RU)**

(73) Патентообладатель(и):

**Общество с ограниченной
ответственностью "Центр ультразвуковых
технологий АлтГТУ" (RU)**

(54) Способ ультразвуковой коагуляции

(57) Реферат:

Изобретение относится к технологиям очистки газов от инородных включений твердых и жидких частиц за счет воздействия на них ультразвуковыми колебаниями высокой интенсивности, а именно к способам ультразвуковой коагуляции частиц размером менее 2,5 мкм. Способ ультразвуковой коагуляции заключается в пропускании газового потока с инородными частицами между двумя поверхностями, одна из которых излучает и формирует ультразвуковые колебания, а вторая отражает прошедшие через поток колебания, излучение ультразвуковых колебаний осуществляют изгибно-колеблющейся пластиной, на плоской излучающей поверхности которой формируют максимумы и минимумы колебаний, чередующиеся последовательно на расстоянии друг от друга, соответствующем половине длины волны изгибных колебаний в материале пластины на частоте равной 22 кГц с интенсивностью 140-150 дБ, газовый поток формируют путем введения его в центральной части отражающей поверхности и распространения к периферическим

областям поверхностей. Технический результат - повышение эффективности коагуляции в 3-10 раз за счет увеличения амплитуды колебаний, создания вихревых потоков между излучающей и отражающей поверхностями, которые позволяют увеличить время ультразвукового воздействия на каждую частичку и создать зоны локального увеличения концентрации субмикронных частиц. 1 ил.

Изобретение относится к области технологий очистки газов от инородных включений твердых и жидких частиц за счет воздействия на них ультразвуковыми колебаниями высокой интенсивности, а именно к способам ультразвуковой коагуляции частиц размером менее 2,5 мкм.

В настоящее время все большее внимание уделяется повышению эффективности способов газоочистки, особенно от частиц размером менее 2,5 мкм. Это связано с огромной опасностью таких частиц из-за высокой суммарной поверхности (более 55% от суммарной поверхности частиц, выбрасываемых в атмосферу) и счетной концентрации (более 95% от суммарной счетной концентрация даже при незначительной массовой доле, менее 1% от суммарной доли аэрозолей, содержащихся в атмосфере). При этом, благодаря малым размерам и массе такие аэрозоли могут длительное время удерживаться в воздухе и способны легко проникать в альвеолы легких человека, вызывая необратимые изменения организма.

Для того, что бы провести очистку газа, который имеет определенное количество частиц, загрязняющих этот газ, необходимо пропустить данный газ через специальные устройства для их коагуляции. Способы коагуляции могут быть основаны на различных физических явлениях и принципах воздействия на загрязняющие газ частицы, например, на реализации процессов инерции и центробежных явлений [1]. Известные способы коагуляции хорошо показали себя при улавливании загрязняющих частиц размерами более 2,5 мкм до 10 мкм. Эффективность известных способов коагуляции частиц размером более 10 мкм может достигать 99%.

Однако, все известные в настоящее время способы коагуляции не способны обеспечить коагуляцию субмикронных частиц (частиц размером менее 2,5 мкм). Обусловлено это отсутствием эффективных физических механизмов воздействия на субмикронные частицы. Известно, что эффективность известных способов коагуляции частиц размером менее 2,5 мкм менее 5...10%.

Наиболее эффективные способы удаление таких частиц основаны на применении акустических или ультразвуковых (УЗ) колебаний высокой интенсивности, которые способны осуществлять дополнительное воздействие и на газовую среду, и на частицы в ней.

Общеизвестно, что воздействие упругими колебаниями на газовые среды создает два типа нелинейных эффектов [2, 3] в газах, содержащих дисперсные частицы:

- эффекты, возникающие за счет явлений переноса импульса газовой фазы между частицами;
- эффекты, возникающие за счет колебательных движений твердых частиц друг относительно друга.

Первая группа эффектов обуславливает гидродинамический механизм (впервые описанный В. Кенигом в 1891 г. [4]) агломерации частиц, когда эквивалентные силы гидродинамического взаимодействия (переносчиками взаимодействия выступают молекулы сплошной газовой фазы) приближают частицы друг к другу и способствуют их агломерации.

Сила гидродинамического взаимодействия пропорциональна квадрату амплитуды колебательной скорости газа и определяется согласно следующему выражению:

$$f_{21} = \frac{3\pi\rho_0 U_0^2}{2} \frac{a_1^3 a_2^3}{l^4} \quad (1)$$

где U_0 - амплитуда колебательной скорости газовой среды в отсутствие аэрозольных частиц, м/с; ρ_0 - плотность газовой фазы, кг/м³; a_1, a_2 - радиусы частиц, участвующих в агломерации, м; l - расстояние между частицами, м.

При этом доля частиц, вступивших в агломерацию, пропорциональна не только силе взаимодействия частиц, но и концентрации частиц.

Таким образом, благодаря применению акустических колебаний отдельные частицы подвергаются воздействию механических колебаний и потоков окружающего газа, начинают двигаться быстрее, вероятность их столкновений с другими частицами возрастает, они чаще соударяются и объединяются. Происходит увеличение их размеров, вследствие чего, становится возможным улавливать укрупненные частицы при помощи различных известных способов, реализуемых, например, с помощью сепараторов.

Поскольку звуковые колебания высокой интенсивности крайне опасны для окружающего мира, то возникает необходимость использовать ультразвуковые колебания ($f > 20$ кГц). УЗ воздействие абсолютно безопасно для окружающего пространства даже при высокой силе ультразвука ($J > 130 \dots 150$ дБ). Поскольку для объединения и удаления загрязняющих частиц осуществляется ультразвуковое воздействие и такой способ получил название способа ультразвуковой коагуляции.

Однако при очистке газов от частиц размером менее 2,5 данная сила взаимодействия оказывается малой, поскольку она фактически пропорциональна 6-й степени диаметра частиц. Поэтому, например, для частиц размером 2,5 мкм эта сила в 64 раза меньше, чем для частиц размером 5 мкм. Кроме того, при малых концентрациях частиц существенно уменьшает силу взаимодействия большое расстояние между частицами. А также концентрация частиц как независимый параметр вносит пропорциональный вклад в итоговую вероятность агломерации.

В свою очередь, ортокинетический механизм (впервые описанной. Брандт, Х. Фройнд, Е. Хидеман [5]) заключается в том, что частица колеблется с газовой фазой не синхронно, а осуществляет скольжение относительно газовой фазы и колебания с меньшей амплитудой смещения, чем сам газ. Эффект скольжения связан с инерционностью частицы. Отношение амплитуды колебаний частицы к амплитуде колебаний газа называется коэффициентом увлечения. Используется также понятие комплексного коэффициента увлечения, который учитывает фазовый сдвиг между колебаниями газа и частицы. Однако для частиц размером менее 2,5 мкм модуль коэффициента увлечения близок к 1, т.е. все частицы колеблются практически одинаково, и соответственно, ортокинетическое взаимодействие не реализуется.

Поэтому даже способы коагуляции, основанные на применении ультразвукового воздействия являются низкоэффективными, и по данным многочисленных исследований [6, 7] эффективность способов УЗ коагуляции частиц размером 2,5 мкм и менее не превышает 20...35%.

Дополнительной причиной, снижающей эффективность коагуляции при реализации известных способов УЗ коагуляции является значительное затухание ультразвуковых колебаний с увеличением расстояния от излучателя, ослабление колебаний из-за дифракционного расхождения и непредсказуемого сложения с различными фазами формируемых и отражаемых колебаний от различных отражающих поверхностей и элементов коагуляционных камер, в которых реализуются известные способы УЗ коагуляции.

Наиболее близким по технической сущности к предлагаемому техническому решению, является способ ультразвуковой коагуляции, реализованный в патенте [8], принятый за прототип и позволяющий частично устранить недостатки известных способов.

Способ ультразвуковой коагуляции заключается в пропускании газового потока с инородными частицами между двумя плоскими поверхностями, одна из которых формирует ультразвуковые колебания, а вторая отражает прошедшие через поток колебания в направлении излучающей поверхности, осуществлении воздействия ультразвуковыми колебаниями на газовый поток при его движении между излучающей и отражающей поверхностями в течении времени, необходимого и достаточного для коагуляции частиц и для их последующего удаления.

Особенностью способа ультразвуковой коагуляции, принятого за прототип является формирование и распространение ультразвуковых колебаний в резонансном режиме, когда формируемый и отраженные колебания складываются в фазе, усиливая

амплитуду распространяемых колебаний и обеспечивая тем самым повышение эффективности коагуляции.

При реализации прототипа появляется принципиальная возможность увеличить до трех раз амплитуду распространяемых колебаний за счет формирования режима стоячей волны, существенно увеличив воздействие на частицы.

К сожалению, возникающие при реализации прототипа потоки газа с инородными частицами приводят к существенному затуханию колебаний и нарушению резонансных режимов воздействия.

Кроме того, как было показано ранее, само ультразвуковое воздействие на потоки, распространяемые между излучающей и отражающей поверхностями малоэффективно из-за малой концентрации инородных частиц, малого времени нахождения в зоне воздействия, неравномерного воздействия в различных зонах камеры из-за поглощения колебаний.

Наличие не устраненных недостатков прототипа не позволяет реализовать возможности коагуляции субмикронных частиц, размер которых менее 2,5 мкм.

Предлагаемый способ ультразвуковой коагуляции направлен на устранение недостатков прототипа и создание условий обеспечения возможности коагуляции субмикронных частиц, размер которых менее 2,5 мкм для создание современной материально-технической базы коагуляции субмикронных частиц.

Суть предлагаемого технического решения заключается в том, что в известном способе ультразвуковой коагуляции, заключающемся в пропускании газового потока с инородными частицами между двумя поверхностями, одна из которых излучает и формирует ультразвуковые колебания, а вторая отражает прошедшие через поток колебания в направлении к излучающей поверхности, воздействие ультразвуковыми колебаниями на газовый поток осуществляют при его движении между излучающей и отражающей поверхностями в течении времени, необходимого и достаточного для коагуляции частиц до размеров, достаточных для их объединения и последующего удаления, формирование и излучение ультразвуковых колебаний осуществляют изгибно-колеблющейся пластиной, на плоской излучающей поверхности которой формируют максимумы и минимумы колебаний, чередующиеся последовательно на расстоянии друг от друга, соответствующем половине длины волны изгибных колебаний в материале пластины на частоте не менее 22 кГц с интенсивностью не менее 140 дБ, газовый поток формируют путем введения его в центральной части отражающей поверхности и распространения к периферическим областям поверхностей, воздействие ультразвуковыми колебаниями на газовый поток осуществляют при его движении между излучающей и отражающей поверхностями, находящимися на расстоянии, соответствующем половине длины волны ультразвуковых колебаний в газовой среде на частоте изгибных колебаний, выведение очищенного потока и инородных частиц осуществляют за периферической зоной отражающей поверхности.

В предлагаемом способе ультразвуковой коагуляции в газовых потоках задача повышения эффективности коагуляции решается путем создания нового способа ультразвуковой коагуляции, способного повысить эффективности коагуляции субмикронных частиц за счет увеличения ультразвукового воздействия (амплитуды колебаний), создания вихревых потоков между излучающей и отражающей поверхностями, которые позволят увеличить эффективность ультразвукового воздействия за счет увеличения времени ультразвукового воздействия на каждую частичку и создать зоны локального увеличения концентрации субмикронных частиц.

Сущность технического решения поясняется фиг. 1, на которой схематично изображено устройство, реализующее предложенный способ ультразвуковой коагуляции.

В способе ультразвуковой коагуляции для создания высокоинтенсивных акустических полей используется пьезоэлектрическая колебательная система 1, состоящая пьезоэлектрического преобразователя электрических колебаний в механические 2, концентратора-усилителя механических колебаний 3, излучателя-рабочего инструмента в виде пластины (диска) 4 с плоской излучающей поверхностью. Перед излучающей поверхностью устанавливается отражающая

ультразвуковые колебания поверхность 5. Таким образом, ультразвуковая колебательная система устанавливается сверху коагуляционной камеры, формируемой между излучающей и отражающей пластинами. Через входной патрубок 6, который располагается в центральной части отражающей поверхности подается загрязненный частицам газ 7 и он распространения к периферическим областям поверхностей отражающей поверхности в коагуляционной камере. Очищенный газ 8 и скоагулированные (объединенные и увеличенные в размерах) частицы 9 выводятся за пределы технологического объема через выходные патрубки 10. В процессе прохождения газа между двумя плоскостями (отражателем и излучателем) осуществляется ультразвуковое воздействие изгибно-колеблющейся пластиной, на плоской излучающей поверхности которой формируют максимумы и минимумы колебаний, чередующиеся последовательно на расстоянии друг от друга, соответствующем половине длины волны изгибных колебаний в материале пластины на частоте не менее 22 кГц с интенсивностью не менее 140 дБ. Пластина с плоской излучающей поверхностью формирует в зазоре между излучающей и отражающей поверхностями синусоидальное распределение амплитуд механических колебаний 11. Благодаря созданию разнонаправленных колебательных движений на участках, отличающихся фазами на 180 градусов (условия создания разряжения и повышенного давления на области газа), образуются вихревые течения 12. Инородные частицы, попадая в эти вихревые потоки более длительное время подвергаются УЗ воздействию, формируются условия повышения концентраций частиц на участках изменений направления их движения. Такое дополнительное движение частиц значительно увеличивают эффективность коагуляции загрязняющих частиц. При этом частицы, по мере их продвижения к периферической области коагуляционной камеры последовательно попадают в каждый последующий сформированный вихрь, увеличиваясь в размерах. После коагуляции частицы уносятся потоком воздуха к периферическим областям камеры, где частицы сталкиваются с перегородкой 13, которая служит для разделения очищенного воздуха и скоагулированных частиц. Корпус 14 служит для обеспечения защиты расположенных внутри элементов от механических повреждений в процессе эксплуатации или хранения, а также для защиты от пыли, влаги и любых других внешних воздействий. За крепежный фланец 15 крепится ультразвуковая колебательная система.

Способ ультразвуковой коагуляции реализуется следующим образом. Акустическое воздействие на загрязняющие частицы, подаваемые с потоком газа через входной патрубок, в процессе ультразвуковой коагуляции осуществляется колебаниями, создаваемыми рабочей поверхностью плоского излучателя на частоте равной 22 кГц. При этом толщина воздушного промежутка между излучателем и отражателем ультразвуковых колебаний равна половине длины ультразвуковой волны в газе. Выбор такой толщины воздушного промежутка связан с необходимостью создать условия, обеспечивающие максимальное резонансное усиление колебаний (за счет синфазного сложения первичной и отраженной волны) и сформировать максимальные по скорости потоки движения частиц в формируемых вихревых потоках

Таким образом, создание вихревых потоков за счет формирования УЗ колебаний в резонансном промежутке значительно увеличивают время и эффективность УЗ воздействия на загрязняющие частицы газ, а, следовательно, и саму эффективность процесса коагуляции частиц.

Практические конструкции предлагаемого способа УЗ коагуляции могут быть реализованы на базе имеющихся ультразвуковых аппаратов серии «Соловей» различных мощностей [9].

Для подтверждения эффективности предложенного способа ультразвуковой коагуляции были проведены экспериментальные исследования, которые позволили выявить, что эффективность коагуляции при наличии вихревых потоков выше в 3...10 раз чем без формирования акустических потоков в диапазоне уровней (142...150 дБ) звукового давления формируемых существующими излучателями.

Практическая реализация предлагаемого технического решения запланирована к реализации ООО «Центр ультразвуковых технологий АлтГТУ» в 2021 году.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №

19-19-00121.

Список литературы, использованной при составлении заявки

1. Циклонный пылеотделяющий аппарат [Текст]: патент US 7422615 B2: МПК B01D 45/12 (2006.01) / Tak-Soo Kim; правообладатель - Samsung Gwangju Electronics Co., Ltd. (US), заявка: 11/1286262 от 13.05.2005. Опубликовано: 09.09.2008.
2. Sheng, C. Simulation of acoustic agglomeration processes of poly-disperse solid particles [Текст] / C. Sheng, X. Shen // Aerosol Science and Technology. - 2007. - Vol. 41. - Iss. 1. - P. 1-13.
3. V.N. Khmelev, A.V. Shalunov, R.N. Golykh, R.S. Dorovskikh, V.A. Nesterov, S.S. Khmelev, K.V. Shalunova. Efficiency Increase of Wet Gas Cleaning from Dispersed Admixtures by the Application of Ultrasonic Fields // Archives of Acoustics. - Institute of Fundamental Technological Research PAN, Warszawa, 2016. - Vol. 40, No. 4. - P. 757-771.
4. W. König. Hydrodynamisch-akustische Untersuchungen. Über die Kräfte zwischen zwei Kugeln in einer schwingenden Fltissigkeit und über die Entstehung der Kundtschen Staubfiguren. - Ann. Phys. und Chem., 42, 4, 549, 1891.
5. O. Brandt, H. Freund, E. Hiedemann. Zur Theorie der akustischen Koagulation. Kolloid.-Z., 77, 193, 1936.
6. E. Riera, I. González-Gomez, G. Rodriguez, J.A. Gallego-Juarez. Ultrasonic agglomeration and preconditioning of aerosol particles for environmental and other applications // Power Ultrasonics: Application of High-intensity Ultrasound. Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials. -2015. - Number 66. - P. 1023-1058.
7. Bing Feng Ng, Jin Wen Xiong, Man Pun Wan. Application of acoustic agglomeration to enhance air filtration efficiency in airconditioning and mechanical ventilation (ACMV) systems // PLoS One. - 2017. - June 8. - 26 p.
8. Ультразвуковая коагуляционная камера [Текст]: патент ПМ 102197 РФ: МПК B01D 51/08 (2006.1) / Хмелев В.Н., Шалунов А.В., Шалунова К.В.; правообладатель - Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова" (АлтГТУ) (RU) - прототип.
9. Каталог ультразвуковых аппаратов для газовых сред [Электронный ресурс]. - Режим доступа: http://u-sonic.com/catalog/apparatu_dlva_uskoreniya_protssesov_v_Razovykh_sredakh/, свободный - (05.02.2021).

Формула изобретения

Способ ультразвуковой коагуляции субмикронных инородных частиц в газовых потоках, заключающийся в пропускании газового потока с инородными частицами размером менее 2,5 мкм между двумя поверхностями, одна из которых излучает и формирует ультразвуковые колебания, а вторая отражает прошедшие через поток колебания в направлении к излучающей поверхности, воздействие ультразвуковыми колебаниями на газовый поток осуществляют при его движении между излучающей и отражающей поверхностями в течение времени, необходимого и достаточного для коагуляции частиц до размеров, достаточных для их объединения и последующего удаления, отличающийся тем, что формирование и излучение ультразвуковых колебаний осуществляют изгибно-колеблющейся пластиной, на плоской излучающей поверхности которой формируют максимумы и минимумы колебаний, чередующиеся последовательно на расстоянии друг от друга, соответствующем половине длины волны изгибных колебаний в материале пластины на частоте равной 22 кГц и с интенсивностью не менее 140-150 дБ, газовый поток формируют путем введения его в центральной части отражающей поверхности и распространения к периферическим областям поверхностей, воздействие ультразвуковыми колебаниями на газовый поток осуществляют при его движении между излучающей и отражающей поверхностями, находящимися на расстоянии, соответствующем половине длины волны ультразвуковых колебаний в газовой среде на частоте изгибных колебаний, выведение очищенного потока и инородных частиц осуществляют за периферической зоной отражающей поверхности.

