ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА КОАГУЛЯЦИИ ЧАСТИЦ АЭРОЗОЛЯ В УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КАМЕРЕ СКРУББЕРА

А.А. Антонникова

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук, Бийск

В данной работе представлены результаты исследования процесса коагуляции частиц аэрозоля моноаммонийфосфата в модельной ультразвуковой (УЗ) камере скруббера. Изучено поведение аэрозольных частиц внутри камеры на расстоянии 100 мм и 400 мм от ультразвукового излучателя с частотой излучения 22 кГц. Представленные результаты показывают практически отсутствие коагуляции частиц при интенсивности звукового давления 140 дБ и процесс активной коагуляции при интенсивности звукового давления 150 дБ для выбранного образца. Начальная массовая концентрация фосфата аммония в камере составляла 1 г/м³. Измерения дисперсного состава аэрозоля внутри камеры показали, что более интенсивно коагуляция проходила в области 400 мм. Через 30 минут воздействия значение среднего объемно-поверхностного диаметра частиц аэрозоля в камере изменилось на 238,4 %.

Ключевые слова: аэрозоль, коагуляция частиц, камера скруббера, ультразвук.

ВВЕДЕНИЕ

Загрязнение воздуха твердофазными аэрозолями даже в малых концентрациях отрицательно сказывается на здоровье человека [1]. Связано это с тем, что частицы микронных и субмикронных размеров проникают глубоко в легкие, где благополучно оседают [2]. Целый ряд технологических процессов сопровождается образованием мельчайших частиц твердого вещества [3, 4], которые попадают в окружающую среду. В промышленности, с целью уменьшения последствия выбросов, широко применяются различные типы устройств для фильтрации газов от вредных веществ, опасных для здоровья людей. Примером таких устройств являются циклоны, электрофилтры, скрубберы [5-7]. Данные конструкции эффективно работают для частиц размером более нескольких микрон, но неудовлетворительно для частиц меньшего размера [8]. Разработка новых аппаратов очистки газов от твердых частиц микронного и субмикронного размера, как и повышение их эффективности, является актуальной задачей в настоящее время [9-11]. Много работ в этой области связано с использованием акустического воздействия на аэрозольные среды [12-15]. Авторы [16] исследовали воздействие ультразвука на аэрозоль сажи с модалным радиусом распределения частиц по размерам от 0,1 до 0,57 мкм. Для получения функции распределения частиц по размерам применялся метод отбора проб с последующим анализом на электронном микроскопе, что не дает полной картины происходящих процессов в ультразвуковой камере скруббера. В другой работе [17] они представили результаты по уменьшению численной концентрации частиц размером от 0,01 до 0,1 мкм в потоке после

камеры ультразвуковой агломерации. При частоте ультразвукового излучения 21 кГц и интенсивности звукового давления 151 дБ авторы достигли уменьшения численной концентрации частиц в потоке на 25 % при отсутствии влажности и до 56 % при влажности 6 %.

Применение ультразвука увеличивает скорость коагуляции частиц аэрозоля, тем самым повышая эффективность очистки, но коагуляция частиц в статическом потоке под действием ультразвуковой волны внутри скруббера недостаточно исследована. Так, в работе [18] аэрозоль, проходящий через камеру, подвергался ультразвуковому воздействию очень короткое время, так как скорость потока 12 л/мин.

В данной работе исследован процесс изменения дисперсных характеристик аэрозоля в камере скруббера большего размера на расстоянии 100 мм и 400 мм от ультразвукового излучателя при уровнях звукового давления 150 дБ и 140 дБ для моноаммонийфосфата. Это позволит определить оптимальные параметры для конструирования скрубберов, использующих ультразвуковую коагуляцию.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Установка для экспериментальных исследований включала в себя: камеру агломерации аэрозоля, генератор аэрозоля, дисковый ультразвуковой излучатель и лазерную измерительную установку. Принципиальная схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Исследования проводились в герметичной аэрозольной камере скруббера, которая представляла собой куб со сторонами по 800 мм.

Для создания аэрозоля использовался эжекционный распылитель порошков, который содержит корпус с выходным соплом, патрубков

подачи распыляемого вещества и подвод газа от источника сжатого воздуха. Источник сжатого воздуха обеспечивал давление газа, равное 200 кПа. Для отсека из потока крупной фракции частиц аэрозоль подводился через изогнутую трубу диаметром 100 мм и длиной 1400 мм. Ввод аэрозоля в камеру агломерации осуществлялся сверху.

Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Воздействующее на аэрозоль акустическое поле создавалось с помощью ультразвукового дискового излучателя [19], который имеет следующие основные характеристики: рабочая частота ультразвуковых колебаний 22 кГц; максимальный уровень звукового давления не менее 150 дБ в пределах 1 м; диаметр дискового излучателя 320 мм. В аппарате предусмотрена возможность изменения мощности излучения от 40 % до 100 %. Ультразвуковой дисковый излучатель был жестко закреплен к аэрозольной камере скруббера сбоку. Диск излучателя был размещен внутри камеры, центральная ось излучателя располагалась горизонтально. Место входа излучателя в аэрозольную камеру скруббера было герметизировано резиновым уплотнителем.

С использованием шумомера были определены профили уровня звукового давления на расстоянии 120 мм и 300 мм от излучателя. Микрофон шумомера перемещали от центра к краю излучателя. Измерения проходили во всем диапазоне мощностей излучателя. На рис. 2 представлен профиль уровня звукового давления излучателя ультразвукового аппарата. При изменении мощности излучения характер профиля оставался одинаковым, происходят изменения уровня звукового давления.

Рис. 2. Профиль уровня звукового давления дискового излучателя диаметром 320 мм

Для исследования механизмов воздействия ультразвука на частицы на различном расстоянии от излучателя в аэрозольную камеру скруббера были вмонтированы приемный и излучающий блоки лазерной установки для измерения аэрозолей и спреев (Malvern, Spraytec). Лазерная установка позволяет получать информацию о дисперсности аэрозоля в диапазоне от 0,1 мкм до 900 мкм с частотой от 1 Гц до 10 кГц. Схема расположения измерительной установки в камере скруббера приведена на рис. 3.

Рис. 3. Схема измерительной системы в камере скруббера

Расстояние между приемным и излучающим блоками измерительной установки равнялось 550 мм. Лазерный луч установки имеет диаметр пучка порядка 12 мм, что сопоставимо с длиной волны ультразвукового излучения, равной 15 мм. Это позволяет захватить зоны агломерации частиц, которые находятся в узлах давления ультразвукового поля стоячей волны.

Для смещения зоны измерения в аэрозольной камере скруббера проделаны отверстия, которые закрываются специальными перемещающимися «шторками» (рис. 4).

Рис. 4. Вид измерительной системы в камере скруббера

В исследовании использовался аэрозоль моноаммонийфосфата, который создавался эжекционным распылением. Для выбранного аэрозоля были определены дисперсные характеристики частиц (массовая функция распределения частиц по размерам и средний объемно-поверхностный диаметр) без воздействия ультразвукового излучения в зависимости от времени нахождения аэрозоля в камере. Полученные распределения представлены на рис. 5. Преобразование массовой функции распределения в счетную и обратно осуществлялось по формулам 1, 2 [20]:

$$V(D) = N(D) \frac{\pi D^3}{6}, \quad (1)$$

$$M(D) = V(D) \rho, \quad (2)$$

где $N(D)$, $V(D)$, $M(D)$ – счетное, объемное и массовое распределение частиц по размерам, соответственно, D – размер частиц, ρ – плотность частиц.

Средний объемно-поверхностный диаметр определялся по формуле 3:

$$D_{32} = \frac{\int_0^\infty D^3 N(D) dD}{\int_0^\infty D^2 N(D) dD}. \quad (3)$$

Используя формулы 1-3, получен средний объемно-поверхностный диаметр частиц D_{32} после окончания процесса распыления для аэрозоля фосфата аммония, который равнялся 7,89 мкм.

Рис. 5. Дисперсность аэрозоля фосфата аммония без воздействия ультразвука

Исследование влияния ультразвукового поля на агломерацию частиц в камере скруббера проводилось путем сравнения результатов, полученных с применением ультразвука и без. Подача аэрозоля в камеру происходила в течение первых 60 с, на 100 с происходило включение ультразвукового излучателя.

Результаты по воздействию ультразвука в камере агломерации скруббера на порошок моноаммонийфосфата приведены на рис. 6-9.

На рис. 6 представлены экспериментальные данные изменения D_{32} и концентрации C_m от времени для выбранного аэрозоля моноаммонийфосфата при воздействии ультразвукового излучения с уровнем звукового давления 150 дБ и без воздействия на расстоянии 100 мм и 400 мм от излучателя.

Рис. 6. Изменения среднего объемно-поверхностного диаметра и концентрации частиц аэрозоля фосфата аммония при воздействии ультразвука с уровнем звукового давления 150 дБ

Динамика изменения среднего объемно-поверхностного диаметра частиц на графике (рис. 6) свидетельствует о начале интенсивного процесса коагуляции после 200 с под воздействием

ультразвукового излучения. Если в первые 200 с D_{32} изменялся на $0,04 \div 0,07$ мкм/с, то после – изменения стали $0,26 \div 0,31$ мкм/с. В области 100 мм от источника излучения D_{32} через 600 с после начала воздействия увеличился с 7,89 мкм до 8,77 мкм, а в области 400 мм – до 12,15 мкм. При этом увеличение концентрации в области 400 мм от излучателя свидетельствует об образовании крупных агломератов частиц.

Рис. 7. Изменения массовой функции распределения частиц по размерам аэрозоля фосфата аммония при воздействии ультразвука с уровнем звукового давления 150 dB

Массовая функция распределения частиц по размерам (рис. 7) свидетельствует об увеличении количества частиц от 40 мкм до 200 мкм.

При уровне звукового давления 140 dB влияние ультразвука на порошок фосфата аммония проявлялось значительно слабее, что иллюстрируют рис. 8, 9.

Рис. 8. Изменения среднего объемно-поверхностного диаметра и концентрации частиц аэрозоля фосфата аммония при воздействии ультразвука с уровнем звукового давления 140 dB

Рис. 9. Изменения массовой функции распределения частиц по размерам аэрозоля фосфата аммония при воздействии ультразвука с уровнем звукового давления 140 dB

Понижение интенсивности звукового давления до 140 dB приводит к уменьшению процесса коагуляции частиц. Здесь прослеживается динамика гравитационного осаждения частиц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе изучен процесс коагуляции аэрозоля фосфата аммония, размер частиц которого равен 7,89 мкм, внутри ультразвуковой камеры скруббера на расстоянии 100 мм и 400 мм от излучателя ультразвука с частотой излучения 22 кГц.

Результаты, представленные на рис. 6, 7, показывают активную коагуляцию частиц при интенсивности звукового давления 150 dB. Тогда как результаты, представленные на рис. 8, 9, демонстрируют практически отсутствие коагуляции частиц при интенсивности звукового давления 140 dB. Данные показатели хорошо согласуются с ранее проведенными экспериментальными исследованиями [21], где в ультразвуковую камеру скруббера распыляли 15 %-ый раствор глицерина эжекционным способом распыления ($D_{32}=3,47$ мкм) и с помощью генератора дыма ($D_{32}=1,75$ мкм). Также полученные результаты сопоставимы выводам других авторов [17].

Данные рис. 6, 7 демонстрируют более интенсивную коагуляцию частиц в области 400 мм, чем в области 100 мм от ультразвукового излучателя. В областях 100 мм и 400 мм от излучателя коагуляция частиц наблюдается спустя 30 минут после включения ультразвукового излучателя. Значение D_{32} в областях увеличилось на 124,3 % и 238,4 % соответственно. Увеличение концентрации частиц в областях измерения свидетельствует об образовании скоплений частиц в узлах давления ультразвукового поля стоячей волны [22].

Исследования показали, что наиболее интенсивно коагуляция проходила в области 400 мм от ультразвукового излучателя. Полученные результаты позволяют повысить эффективность очистки газовых

потоков от субмикронных частиц в ультразвуковых камерах скруббера с вводом дополнительной жидкостной фазы за счет оптимального размещения ультразвукового излучателя относительно потока и распыления оптимальной крупной дополнительной фракции аэрозоля.

Работа выполнена в рамках базового бюджетного проекта «Энергонасыщенные материалы: разработка, создание и применение», при использовании приборной базы Бийского регионального центра коллективного пользования СО РАН (ИПХЭТ СО РАН, г. Бийск).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Dockery, D.W. Acute respiratory effects of particulate air pollution / D.W. Dockery, C.A. Pope // Annual review of public health. – 1994. – V. 15, № 1. – P. 107–132.
2. Deposition of particles in the human respiratory tract in the size range 0.005–15 μm / J. Heyder [et al.] // Journal of Aerosol Science/ 1986. – V. 17, № 5. – P. 811–825.
3. Ahn, Y.C. Physical, chemical, and electrical analysis of aerosol particles generated from industrial plants / Y.C. Ahn, J.K. Lee // Journal of Aerosol Science. – 2006. – V. 37, № 2. – P. 187–202.
4. Utilization of ultrasonic atomization for dust control in underground mining / H. Okawa [et al.] // Japanese Journal of Applied Physics. – 2017. – V. 56(7S1):07JE10.
5. Aerosol mass concentration measurements: Recent advancements of real-time nano/micro systems / U. Soysal [et al.] // Journal of Aerosol Science. – 2017. – V. 114. – P. 42–54.
6. Golestaneh, S.M. Separation of particles from the gas by using of cyclonic separation in the cyclotubes of scrubber installed in gas compressor station / S.M. Golestaneh, D. Toghraie // Powder Technology. – 2019. – V. 343. – P. 392–421.
7. Flagan, R.C. Fundamentals of Air Pollution Engineering / R.C. Flagan, J.H. Seinfeld // Physics. – 1988. – P. 554 с.
8. An Efficient Wet Scrubber to Remove Micron and Submicron Particles from Exhaust Gas / Z. Zheng [et al.] // Journal of chemical engineering of Japan. – 2018. – V. 51, № 10. – P. 839–847.
9. The development and characterization of a novel coagulant for dust suppression in open-cast coal mines / G. Zhou [et al.] // Adsorption Science and Technology. – 2018. – V. 36, № 1–2. – P. 608–624.
10. Development of high-gravity technology for removing particulate and gaseous pollutant emissions: Principles and applications / S.-Y. Pan [et al.] // Journal of Cleaner Production – 2017. – V. 149. – P. 540–556.
11. Development of a flooded-bed scrubber for removing coal dust at a longwall mining section / S. Arya [et al.] // Safety Science – 2018. – V. 110. – P. 204–213.
12. The effect of aerosol size distribution and concentration on the removal efficiency of an acoustic aerosol removal system / W.T. Yuen [et al.] // Journal of Aerosol Science. – 2017. – V. 104. – P. 79–89.
13. Removal of fine particles from coal combustion in the combined effect of acoustic agglomeration and seed droplets with wetting agent / J. Yan [et al.] // Fuel. – 2016. – V. 165. – P. 316–323.
14. Ultrasonic agglomeration and preconditioning of aerosol particles for environmental and other applications / E. Riera [et al.] // Power Ultrasonics. Applications of High-Intensity Ultrasound. – 2014. – pp.1023–1058.
15. Application of acoustic agglomeration to enhance air filtration efficiency in air-conditioning and mechanical ventilation (ACMV) systems / B.F. Ng [et al.] // PLoS ONE. – 2017. – V. 12, № 6. – P. e0178851.
16. Riera-Franco de Sarabia, E. Ultrasonic agglomeration of micron aerosols under standing wave conditions / E. Riera-Franco de Sarabia, J.A. Gallego-Juárez // Journal of Sound and Vibration. – 1986. – V. 110, № 3. – P. 413–427.
17. Investigation of the influence of humidity on the ultrasonic agglomeration of submicron particles in diesel exhausts / E. Riera-

Franco de Sarabia [et al.] // Ultrasonics. – 2003. – V. 41, № 4. – P. 277–281.

18. Ran, W. A mechanistic explanation of the increase in particle scavenging in the ultrasonic scrubber / W. Ran, J.R. Saylor // Journal of Aerosol Science. – 2015. – V. 87. – P. 88–101.

19. Efficiency Increase of Wet Gas Cleaning from Dispersed Admixtures by the Application of Ultrasonic Fields / Khmelev V.N. [et al.] // Archives of Acoustics. – 2016. – V. 41, № 4. – P. 757–771.

20. Baron, P.A. Aerosol Measurement: Principles, Techniques, and Applications / P.A. Baron, K. Willeke – 2nd ed. – Wiley. 2001. – 977 p.

21. Ахмадеев, И.П. Экспериментальное исследование коагуляции аэрозоля в ультразвуковой камере [Текст] / И.П. Ахмадеев, А.А. Антонникова // Южно-Сибирский научный вестник. – 2019. – № 4-1(28). – С. 312–318.

22. Merrell, T. Scavenging of micron-scale particles using a combination of fog and a cylindrical ultrasonic standing wave field / T. Merrell, J.R. Saylor // Journal of Aerosol Science. – 2017. – V. 107. – P. 14–30.

Антонникова Александра Александровна – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), тел.(3854)301869, e-mail: antonnikova.a@mail.ru

STUDY OF THE COAGULATION OF AEROSOL PARTICLES IN THE SCRUBBER ULTRASOUND CHAMBER

A.A. Antonnikova

Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies, Biysk

This paper presents the results of the study of the coagulation of the monoammonium phosphate aerosol particles in the model ultrasonic scrubber chamber. The behavior of aerosol particles inside the chamber is studied at the distance of 100 mm and 400 mm from the ultrasonic emitter with 22 kHz of the radiation frequency. The presented results show almost complete absence of particle coagulation at the sound pressure intensity of 140 dB and the active coagulation process at the intensity of 150 dB for the selected sample. The initial mass concentration of ammonium phosphate in the chamber was 1 g / m³. Measuring the dispersed composition of the aerosol showed that coagulation proceeds more intensively in the region of 400 mm. After 30 minutes of exposure the value of the average surfactant diameter of the aerosol particles in the chamber has changed by 238.4%.

Index terms: aerosol, coagulation of particles, a scrubber chamber, ultrasound.

REFERENCES

1. Dockery, D.W. Acute respiratory effects of particulate air pollution / D.W. Dockery, C.A. Pope // Annual review of public health. – 1994. – V. 15, № 1. – P. 107–132.
2. Deposition of particles in the human respiratory tract in the size range 0.005–15 μm / J. Heyder [et al.] // Journal of Aerosol Science. – 1986. – V. 17, № 5. – P. 811–825.
3. Ahn, Y.C. Physical, chemical, and electrical analysis of aerosol particles generated from industrial plants / Y.C. Ahn, J.K. Lee // Journal of Aerosol Science. – 2006. – V. 37, № 2. – P. 187–202.
4. Utilization of ultrasonic atomization for dust control in underground mining / H. Okawa [et al.] // Japanese Journal of Applied Physics. – 2017. – V. 56(7S1):07JE10.
5. Aerosol mass concentration measurements: Recent advancements of real-time nano/micro systems / U. Soysal [et al.] // Journal of Aerosol Science. – 2017. – V. 114. – P. 42–54.
6. Golestaneh, S.M. Separation of particles from the gas by using of cyclonic separation in the cyclotubes of scrubber installed in gas compressor station / S.M. Golestaneh, D. Toghraie // Powder Technology. – 2019. – V. 343. – P. 392–421.
7. Flagan, R.C. Fundamentals of Air Pollution Engineering / R.C. Flagan, J.H. Seinfeld // Physics. – 1988. – P. 554 c.
8. An Efficient Wet Scrubber to Remove Micron and Submicron Particles from Exhaust Gas / Z. Zheng [et al.] // Journal of chemical engineering of Japan. – 2018. – V. 51, № 10. – P. 839–847.
9. The development and characterization of a novel coagulant for dust suppression in open-cast coal mines / G. Zhou [et al.] // Adsorption Science and Technology. – 2018. – V. 36, № 1–2. – P. 608–624.
10. Development of high-gravity technology for removing particulate and gaseous pollutant emissions: Principles and applications / S.-Y. Pan [et al.] // Journal of Cleaner Production. – 2017. – V. 149. – P. 540–556.
11. Development of a flooded-bed scrubber for removing coal dust at a longwall mining section / S. Arya [et al.] // Safety Science. – 2018. – V. 110. – P. 204–213.
12. The effect of aerosol size distribution and concentration on the removal efficiency of an acoustic aerosol removal system / W.T. Yuen [et al.] // Journal of Aerosol Science. – 2017. – V. 104. – P. 79–89.
13. Removal of fine particles from coal combustion in the combined effect of acoustic agglomeration and seed droplets with wetting agent / J. Yan [et al.] // Fuel. – 2016. – V. 165. – P. 316–323.
14. Ultrasonic agglomeration and preconditioning of aerosol particles for environmental and other applications / E. Riera [et al.] // Power Ultrasonics. Applications of High-Intensity Ultrasound. – 2014. – pp.1023–1058.
15. Application of acoustic agglomeration to enhance air filtration efficiency in air-conditioning and mechanical ventilation (ACMV) systems / B.F. Ng [et al.] // PLoS ONE. – 2017. – V. 12, № 6. – P. e0178851.
16. Riera-Franco de Sarabia, E. Ultrasonic agglomeration of micron aerosols under standing wave conditions / E. Riera-Franco de Sarabia, J.A. Gallego-Juárez // Journal of Sound and Vibration. – 1986. – V. 110, № 3. – P. 413–427.
17. Investigation of the influence of humidity on the ultrasonic agglomeration of submicron particles in diesel exhausts / E. Riera-Franco de Sarabia [et al.] // Ultrasonics. – 2003. – V. 41, № 4. – P. 277–281.
18. Ran, W. A mechanistic explanation of the increase in particle scavenging in the ultrasonic scrubber / W. Ran, J.R. Saylor // Journal of Aerosol Science. – 2015. – V. 87. – P. 88–101.
19. Efficiency Increase of Wet Gas Cleaning from Dispersed Admixtures by the Application of Ultrasonic Fields / Khmelev V.N. [et al.] // Archives of Acoustics. – 2016. – V. 41, № 4. – P. 757–771.
20. Baron, P.A. Aerosol Measurement: Principles, Techniques, and Applications / P.A. Baron, K. Willeke – 2nd ed. – Wiley. 2001. – 977 p.
21. Akhmadeev, I.R. Experimental study of aerosol coagulation in an ultrasonic chamber / I.R. Akhmadeev, A.A. Antonnikova // South-Siberian Scientific Bulletin. – 2019. – № 4-1(28). – P. 312–318.
22. Merrell, T. Scavenging of micron-scale particles using a combination of fog and a cylindrical ultrasonic standing wave field / T. Merrell, J.R. Saylor // Journal of Aerosol Science. – 2017. – V. 107. – P. 14–30.

Antonnikova Alexandra Alexandrovna – researcher, Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, (3854)301869, e-mail: antonnikova.a@mail.ru