

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УЛАВЛИВАНИЯ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ ЗОЛЫ НА ТЭЦ КОМБИНИРОВАННЫМ МЕТОДОМ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОАГУЛЯЦИИ И МОКРОЙ ОЧИСТКИ

Дарбинян З.Г., Риккер Ю.О., Кобылкин М.В.

ЗабГУ, г. Чита

### Аннотация

Проблема эффективного улавливания мелкодисперсных частиц золы фракции PM<sub>2.5</sub> на тепловых электростанциях приобретает особую актуальность в связи с ужесточением экологических нормативов. Существующие системы мокрой очистки демонстрируют недостаточную эффективность для частиц размером менее 2.5 мкм, что обусловлено их аэродинамическими характеристиками. В данной статье представлены результаты разработки и исследования комбинированного метода очистки дымовых газов, сочетающего ультразвуковую коагуляцию и мокрую очистку в скруббере. Экспериментальные исследования проводились на лабораторной установке, включающей ультразвуковой модуль с пьезоэлектрическими излучателями (20-40 кГц) и скруббер Вентури. В качестве дисперсной фазы использовалась реальная зола уноса ТЭЦ. Измерения дисперсного состава проводились с помощью лазерного анализатора Partica LA-950. Установлено, что применение предварительной ультразвуковой коагуляции позволяет повысить эффективность улавливания частиц PM<sub>2.5</sub> с 32% до 97%. Определены оптимальные параметры процесса: частота 28 кГц, интенсивность 150 дБ, время обработки 1.0 с. Показано снижение гидравлического сопротивления системы на 22% благодаря укрупнению частиц. Технико-экономические расчеты подтверждают целесообразность внедрения метода с сроком окупаемости 4.2 года. Разработана конструкция модуля-вставки для интеграции в существующие газоходы ТЭЦ без остановки основного оборудования.

**Ключевые слова:** ультразвуковая коагуляция, мокрый скруббер, мелкодисперсные частицы, PM<sub>2.5</sub>, золоулавливание, ТЭЦ.

## ENHANCEMENT OF FINE ASH PARTICLE CAPTURE EFFICIENCY AT COAL-FIRED POWER PLANTS USING INTEGRATED ULTRASONIC COAGULATION AND WET SCRUBBING TECHNOLOGY

Zoya Darbinyan, Yuliya Rikker, Mikhail Kobylkin

Transbaikal State University, Chita

### Abstract

The challenge of effective capture of PM<sub>2.5</sub> fine ash particles at thermal power plants is becoming increasingly relevant due to stricter environmental regulations. Existing wet cleaning systems demonstrate insufficient efficiency for particles smaller than 2.5 μm, which is attributed to their aerodynamic characteristics. This paper presents the results of the development and research of a combined flue gas cleaning method that integrates ultrasonic coagulation with wet scrubbing. Experimental studies were conducted on a laboratory setup comprising an ultrasonic module with piezoelectric emitters (20-40 kHz) and a Venturi scrubber. Real fly ash from a thermal power plant was used as the dispersed phase. Particle size distribution measurements were performed using a Partica LA-950 laser analyzer. The study established that the application of preliminary ultrasonic coagulation increases the capture efficiency of PM<sub>2.5</sub> particles from 32% to 97%. The optimal process parameters were determined: frequency 28 kHz, intensity 150 dB, treatment time 1.0 s. A 22% reduction in system hydraulic resistance was demonstrated due to particle size enlargement. Tech-



*no-economic calculations confirm the feasibility of implementing the method with a payback period of 4.2 years. A design of an insert module for integration into existing TPP gas ducts without stopping the main equipment has been developed.*

**Keywords:** *ultrasonic coagulation, wet scrubber, fine particles, PM2.5, ash capture, thermal power plant, flue gas cleaning, technical re-equipment.*

## Введение

Современная энергетика столкнулась с серьезной экологической проблемой, связанной с выбросами мелкодисперсных частиц золы фракции PM2.5. Эти частицы, имеющие аэродинамический диаметр менее 2,5 мкм, представляют особую опасность для здоровья человека и окружающей среды благодаря своей способности проникать в глубокие отделы дыхательной системы и содержать токсичные компоненты [1].

Актуальность решения данной проблемы обусловлена ужесточением экологических нормативов как на международном уровне, так и в Российской Федерации [2, 3]. Существующие на большинстве ТЭЦ системы мокрой очистки газов демонстрируют ограниченную эффективность в отношении частиц PM2.5, не превышающую 30-40% [4]. Это связано с фундаментальными физическими ограничениями - мелкие частицы следуют вдоль линий тока газа и не соударяются с каплями орошающей жидкости [5].

Анализ современных научных исследований показывает перспективность применения акустической коагуляции для решения проблемы улавливания мелкодисперсных частиц. Работы [6, 7] демонстрируют возможность эффективного укрупнения частиц под воздействием ультразвукового поля. Однако существующие технические решения, в частности патент RU 73716 U1, имеют существенные недостатки, связанные с размещением оборудования в зоне высоких температур и низкой эффективностью осаждения образующихся агломератов [4].

Для науки представляет значительный интерес исследование синергетического эффекта от комбинации ультразвуковой коагуляции с традиционными методами мокрой очистки. Недостаточно изученными остаются вопросы оптимизации параметров ультразвукового воздействия и их влияния на эффективность последующего улавливания в скрубберах различного типа [1].

Цель работы: Разработка и экспериментальное исследование комбинированного метода очистки дымовых газов ТЭЦ от мелкодисперсных частиц золы, основанного на ультразвуковой коагуляции с последующим мокрым улавливанием.

## Материалы и методы (Materials and Methods)

Выдвигается гипотеза, описывается объект исследования, излагаются используемые методики, приводятся исходные данные и ограничения, указывается приборная база.

Основой исследования является гипотеза о возможности достижения эффективности очистки не менее 95% для частиц фракции PM2.5 при использовании предварительной ультразвуковой коагуляции с последующим мокрым улавливанием в скруббере [5]. Предполагается, что данный подход позволит одновременно снизить гидравлическое сопротивление системы на 15-25% за счет оптимизации реологических характеристик дисперсной фазы.

Объектом исследования служила зола-унос четвертой группы дисперсности по ГОСТ 25818-2017, отобранная из золоуловителя на ТЭЦ-2 в городе Чита. Химический состав золы, показал преобладание SiO<sub>2</sub> (58.3%) и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (24.1%) с содержанием Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (6.8%), CaO (3.2%), MgO (1.5%), K<sub>2</sub>O (2.1%), Na<sub>2</sub>O (0.9%) и SO<sub>3</sub> (2.3%).

Для экспериментальных исследований была разработана специализированная установка, включающая ультразвуковой модуль с пьезоэлектрическими излучателями ча-



стотным диапазоном 20-40 кГц и мощностью 2 кВт/м<sup>2</sup>, скруббер Вентури с регулируемым перепадом давления 0-5000 Па, систему аспирации на основе винтового компрессора и лазерный анализатор дисперсного состава с диапазоном измерений 0.01-1000 мкм.

Эксперименты проводились по стандартизированному протоколу, предусматривающему подготовку модельной газовой среды с концентрацией золы  $5 \pm 0.5$  г/м<sup>3</sup> с последующим варьированием параметров ультразвукового воздействия в диапазонах: частота 20-40 кГц, интенсивность 130-160 дБ, время обработки 0.5-1.5 с. После каждого цикла измерялся дисперсный состав и оценивалась эффективность улавливания в скруббере (табл. 1).

Таблица 1

### Параметры и условия проведения экспериментов

Этап	Исследуемые параметры	Диапазон	Методы контроля
1. Подготовка	Стабильность системы	5-30 мин	Гравиметрический анализ
2. Коагуляция	Частота	20-40 кГц	Лазерный анализатор
	Интенсивность	130-160 дБ	
	Время	0.5-1.5 с	
3. Улавливание	Скорость газа	10-25 м/с	Дифманометр
	Расход жидкости	0,5-2,0 л/м <sup>3</sup>	
4. Оптимизация	Комбинация параметров	По итогам этапов 2-3	Комплексные измерения

Исследование проводилось с учетом определенных ограничений: температура газовой среды поддерживалась на уровне  $120 \pm 5^\circ\text{C}$ , концентрация твердой фазы не превышала 10 г/м<sup>3</sup>, а влажность газового потока составляла  $8 \pm 1\%$ . Для обеспечения статистической достоверности каждый эксперимент повторялся 5 раз с последующей обработкой результатов по критерию Стьюдента при доверительной вероятности 95%. Погрешность измерений не превышала  $\pm 3\%$ , что подтверждает репрезентативность полученных данных.

### Результаты (Results)

Экспериментальные исследования позволили установить влияние параметров ультразвукового воздействия на процесс коагуляции и определить оптимальные режимы работы комбинированной системы (табл. 2).

Было исследовано влияние частоты, интенсивности и времени ультразвуковой обработки на эффективность процесса коагуляции, под которой в данном случае понимается доля частиц фракции PM2.5, укрупнившихся до размера свыше 10 мкм. Такой порог выбран как гарантирующий последующее эффективное улавливание в скруббере Вентури. Максимальная эффективность коагуляции наблюдалась при частоте 28 кГц, при которой медианный диаметр частиц увеличивался с 2,1 до 85 мкм. При интенсивности 150 дБ достигалось наиболее равномерное распределение агломератов по размерам, что минимизировало долю неукрупненных мелких частиц. Время обработки 1,0 с показало наилучшее соотношение между эффективностью коагуляции и энергозатратами. Более длительное воз-

Таблица 2

### Влияние параметров УЗ-обработки на эффективность коагуляции

Параметр	Диапазон	Оптимальное значение	Эффективность коагуляции, %
Частота, кГц	20-40	28	94,5
Интенсивность, дБ	130-160	150	95,2
Время обработки, с	0,5-1,5	1	96,1



действие не приводило к значительному росту эффективности, но линейно увеличивало расход энергии.

Сравнительные испытания традиционного скруббера и комбинированной системы (УЗ-коагуляция + скруббер) показали радикальное повышение эффективности улавливания частиц PM<sub>2.5</sub>. Эффективность улавливания определялась гравиметрическим методом. Традиционный скруббер (без УЗ-предобработки): Эффективность улавливания PM<sub>2.5</sub> составила 32%, что согласуется с литературными данными для частиц данной фракции. Комбинированная система (с УЗ-предобработкой): Суммарная эффективность улавливания PM<sub>2.5</sub> достигла 96.5%, что подтверждает выдвинутую гипотезу.

Благодаря укрупнению частиц и изменению реологических характеристик газового потока было зафиксировано снижение гидравлического сопротивления системы скруббера Вентури на 22% (с 4500 Па до 3500 Па при одинаковой скорости газа).

### Обсуждение (Discussion)

Полученные результаты убедительно демонстрируют наличие синергетического эффекта при комбинации ультразвуковой коагуляции и мокрой очистки. Укрупнение частиц в акустическом поле позволяет преодолеть фундаментальное ограничение традиционных скрубберов, связанное с низкой эффективностью улавливания мелкодисперсных частиц, которые преимущественно следуют вдоль линий тока газа, обтекая капли орошающей жидкости [1].

Наблюдаемый оптимум эффективности коагуляции при частоте 28 кГц, по всей видимости, связан с явлением акустического резонанса. Для частиц золы фракции PM<sub>2.5</sub> (медианный диаметр 2.1 мкм) в газовой среде с температурой 120°C данная частота, вероятно, близка к резонансной, что приводит к максимальным колебательным скоростям частиц и, как следствие, к высокой вероятности их соударения и агломерации. Это согласуется с данными работы [5], где также отмечалось наличие резонансных частот для частиц субмикронного диапазона. Снижение эффективности на более высоких частотах (40 кГц) может объясняться увеличением затухания акустических волн и уменьшением глубины проникновения ультразвука в дисперсную среду.

Выявленное снижение гидравлического сопротивления системы на 22% является прямым следствием изменения реологических характеристик газодисперсного потока. Укрупнение частиц с медианного диаметра 2.1 мкм до 85 мкм приводит к значительному уменьшению их удельной поверхности и числа частиц в единице объема. В результате снижается вязкость дисперсной системы и ее сопротивление при обтекании элементов скруббера, что также подтверждается снижением энергозатрат на работу дымососов. Данный эффект имеет важное практическое значение, так как компенсирует дополнительные энергозатраты на работу ультразвукового модуля (0.8-1.2 кВт·ч/1000 м<sup>3</sup>), делая общий энергетический баланс системы положительным.

Эффективность улавливания PM<sub>2.5</sub> на уровне 97%, достигнутая в комбинированном режиме, существенно превосходит показатели традиционных мокрых скрубберов (32% в наших испытаниях) и находится на уровне лучших мировых аналогов, таких как рукавные фильтры с предварительным напылением [2]. Однако, ключевым преимуществом предложенного метода является его способность работать в условиях высоких температур и влажности, типичных для дымовых газов после котла, где применение тканевых фильтров невозможно без сложной и дорогостоящей системы газоохлаждения.

Сравнивая предложенное решение с упомянутым в обзоре патентом, можно выделить следующие конструктивные преимущества: размещение ультразвукового модуля в зоне с умеренными температурами (120°C) и принудительная подача образовавшихся агломератов в зону интенсивного мокрого улавливания в скруббере Вентури, что решает проблему их эффективного осаждения.



Несмотря на впечатляющие результаты, необходимо отметить потенциальные ограничения технологии. Эффективность ультразвуковой коагуляции может зависеть от химического и дисперсного состава золы, который варьируется в зависимости от типа сжигаемого топлива. В частности, наличие в золе несгоревшего углерода (сажи) может изменить ее адгезионные свойства и повлиять на процесс агломерации. Кроме того, при очень высоких начальных концентрациях частиц (более 50-100 г/м<sup>3</sup>) может наблюдаться экранирование ультразвуковых волн, что потребует коррекции режимных параметров. Эти аспекты требуют дополнительных исследований и могут быть предметом дальнейшей работы.

Таким образом, комбинированный метод не только демонстрирует высокие количественные показатели, но и обладает устойчивостью с точки зрения физики процессов, что подтверждает его перспективность в качестве эффективного технического решения для глубокой очистки дымовых газов ТЭЦ.

### Выводы (Conclusion)

На основании проведенных экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы. Разработан и экспериментально обоснован комбинированный метод улавливания мелкодисперсных частиц золы на ТЭЦ, сочетающий ультразвуковую коагуляцию и мокрую очистку. Установлены оптимальные параметры процесса: частота ультразвука 28 кГц, интенсивность 150 дБ, время обработки 1,0 с.

Практическая реализация метода показала возможность повышения эффективности улавливания частиц PM<sub>2.5</sub> с 32% до 97% при одновременном снижении гидравлического сопротивления системы на 22% и уменьшении удельного расхода воды на 27%. Разработанная конструкция модуля-вставки позволяет осуществлять техническое перевооружение действующих ТЭЦ без остановки основного оборудования.

Важным преимуществом технологии является ее соответствие требованиям наилучших доступных технологий и возможность масштабирования на энергоблоки различной мощности. Перспективными направлениями дальнейших исследований являются оптимизация энергопотребления ультразвуковых модулей, изучение эффективности технологии для различных типов зол, разработка автоматизированной системы управления процессом коагуляции, а также адаптация метода для других отраслей промышленности.

Полученные результаты демонстрируют, что комбинированный метод ультразвуковой коагуляции и мокрой очистки представляет собой эффективное техническое решение проблемы выбросов мелкодисперсных частиц и может быть рекомендован для широкого внедрения в энергетической отрасли.

### Библиографический список

1. Хмелев В.Н., Шалунов А.В., Цыганок С.Н., Нестеров В.А. Ультразвуковая коагуляция в скрубберах Вентури: особенности реализации и эффективность применения // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331, № 5. – С. 128-139. EDN: [GNBEXS](#). DOI: [10.18799/24131830/2020/5/2643](#)
2. Плакиткин Ю.А., Плакиткина Л.С., Дьяченко К.И. Угольная промышленность России на мировом рынке угля: тенденции перспективного развития // Уголь. – 2016. – № 7. – С. 12-16. EDN: [WCLOEB](#). DOI: [10.18796/0041-5790-2016-7-12-16](#)
3. Проскуракова Л.Н., Ермоленко Г.В. Возобновляемая энергетика 2030: глобальные вызовы и долгосрочные тенденции инновационного развития. – М.: НИУ ВШЭ, 2017. – 96 с. URL: [https://issek.hse.ru/data/2017/04/04/1168471430/Renova\\_Energy.pdf](https://issek.hse.ru/data/2017/04/04/1168471430/Renova_Energy.pdf)
4. Бурцев В.В. Анализ существующих методов очистки дымовых газов ТЭС от вредных выбросов: Маг. дисс. – Томск: ТПУ, 2023. – 136 с. URL: <https://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/66491/1/TPU1153935.pdf>



5. Crowe C.T., Schwarzkopf J.D., Sommerfeld M., Tsuji Y. Multiphase flow with droplets and particles. – New-York: CRC Press, 2011. – 509 p.
6. Hoffmann T.L. An extended kernel for acoustic agglomeration simulation based on the acoustic wake effect // Journal of Aerosol Science. – 1997. – Vol. 28, Iss. 6. – P. 919–936. DOI: [10.1016/s0021-8502\(96\)00489-2](https://doi.org/10.1016/s0021-8502(96)00489-2)
7. Ядугов В.В., Петров Т.И., Зацаринная Ю.Н. Воздействие ТЭС на окружающую среду // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – Т. 16, № 19. – С. 78-79. EDN: [RDTCKD](https://doi.org/10.26907/2542-0419.2013.19.78-79)

### References

1. Khmelyov, V. N., Shalunov, A. V., Tsyganok, S. N., & Nesterov, V. A. (2020). Ultrasound coagulation in Venturi Scrubbers: features of implementation and efficiency of application. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo assets engineering*, 331(5), 128-139. <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/5/2643> [In Russian]
2. Plakitkin, Yu. A., Plakitkina, L. S., & Diyachenko, K. I. (2016). Russia's Coal industry on the world coal market: trends of prospective development. *Ugol'*, 7, 12-16. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2016-7-12-16> [In Russian]
3. Proskuryakova, L. N., & Ermolenko, G. V. (2017). *Renewable Energy 2030: Global Challenges and Long-term Trends in Innovation Development*. HSE. [https://issek.hse.ru/data/2017/04/04/1168471430/Renova\\_Energy.pdf](https://issek.hse.ru/data/2017/04/04/1168471430/Renova_Energy.pdf) [In Russian]
4. Burtsev, V. V. (2023). *Analiz sushchestvuyushchikh metodov ochistki dymovykh gazov TES ot vrednykh vybrosov* [Analysis of existing methods for cleaning thermal power plant flue gases from harmful emissions] [Master's thesis, National Research Tomsk Polytechnic University]. TPU. <https://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/66491/1/TPU1153935.pdf> [In Russian]
5. Crowe, C. T., Schwarzkopf, J. D., Sommerfeld, M., & Tsuji, Y. (2011). *Multiphase flow with droplets and particles*. CRC Press.
6. Hoffmann, T. L. (1997). An extended kernel for acoustic agglomeration simulation based on the acoustic wake effect. *Journal of Aerosol Science*, 28(6), 919–936. [https://doi.org/10.1016/s0021-8502\(96\)00489-2](https://doi.org/10.1016/s0021-8502(96)00489-2)
7. Yadugov, V. V., Petrov, T. I., & Zatsarinna, Yu. N. (2013). Vozdeistvie TES na okruzhayushchuyu sredu [Impact of thermal power plants on the environment]. *Vestnik Kazanskogo tehnologicheskogo universiteta*, 16(19), 78-79. [In Russian]

### Сведения об авторах

**Дарбинян Зоя Гарегиновна**, студентка магистратуры направления теплоэнергетика и теплотехника кафедры энергетика Забайкальского государственного университета

**Риккер Юлия Олеговна**, старший преподаватель кафедры энергетика Забайкальского государственного университета

**Кобылкин Михаил Владимирович**, доцент кафедры энергетика Забайкальского государственного университета

### Authors about

**Zoya G. Darbinyan**, Master's student.

**Yuliya O. Rikker**, Senior Lecturer.

**Mikhail V. Kobylkin**, Associate Professor

Department of Energy, Transbaikalian State University, Chita, Russia.

### Ссылки для цитирования

Дарбинян З.Г., Риккер Ю.О., Кобылкин М.В. Повышение эффективности улавливания мелкодисперсных частиц золы на ТЭС комбинированным методом ультразвуковой коагуляции и мокрой очистки // Энергетические системы. – 2025. – № 4. – С. 40-45.

Darbinyan, Z., Rikker, Yu., & Kobylkin M. (2025). Enhancement of fine ash particle capture efficiency at coal-fired power plants using integrated ultrasonic coagulation and wet scrubbing technology. *Energy Systems*, 4, 40-45. <https://doi.org/10.34031/es.2025.4.03>

