

Повышение Эффективности Ультразвуковых Излучателей Для Коагуляции Пыли В Золоулавливающих Установках

В.Н. Хмелев, Р.В. Барсуков, С.Н. Цыганок, В.А. Нестеров, Д.В. Генне, Е.В. Ильченко

Аннотация – В работе показаны пути повышения эффективности работы ультразвуковых излучателей, предназначенных для повышения эффективности золоулавливающих установок ТЭЦ, путем увеличения интенсивности ультразвукового воздействия за счет повышения рабочей мощности пьезопреобразователей. Проведенные работы позволили повысить электрическую мощность с 180 Вт до 330 Вт, увеличив при этом интенсивность ультразвукового излучения каждого излучателя на 3 – 5 дБ. Проведенные исследования позволили подтвердить возможность повышения знакопеременного давления в зоне воздействия в 2 раза.

Ключевые слова – Ультразвук, повышение мощности, дисковый излучатель.

I. ВВЕДЕНИЕ

ОДНИМ ИЗ НАИБОЛЕЕ перспективных способов предварительной обработки пылегазового потока для повышения эффективности улавливания является коагуляция дисперсных частиц за счет высокоинтенсивных акустических колебаний ультразвуковой (УЗ) частоты. При этом реализуется совместное воздействие центробежных сил, при помощи которых частицы отбрасываются ближе к стенкам инерционного газоочистного оборудования (например, труб Вентури) для повышения концентрации частиц в периферийной зоне потока, и УЗ воздействие, эффективность которого возрастает с ростом концентрации частиц [1–3].

Для формирования УЗ колебаний в газовых средах используются УЗ пьезоэлектрические колебательные системы с излучателями в виде изгибно-колеблющихся титановых дисков ступенчатого профиля (УЗ излучатель) [4–6].

Существующие конструкции УЗ излучателей применяются, как правило, в экспериментальных или лабораторных установках, не позволяют создавать акустические поля интенсивностью свыше 120...130 дБ для применения в промышленных установках, например, в золоулавливающих установках (ЗУУ) [7].

При решении практических задач, как правило, используется несколько УЗ излучателей, работающих одновременно, поэтому повышение эффективности таких излучателей, работающих в технологическом объеме с различными по форме и размерам отражательными поверхностями, играет существенное значение.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В ЗУУ ТЭЦ, в состав которых входят трубы Вентури, где необходимо практически реализовать УЗ коагуляцию, конструктивно удалены от других объектов инфраструктуры, в которых располагаются электронные

генераторы УЗ коагуляционного оборудования. Для практической реализации УЗ коагуляции дисперсных частиц в трубе Вентури ЗУУ необходимо увеличить эффективность УЗ воздействия за счет увеличения интенсивности последнего.

Для этого необходимо:

- увеличить мощности пьезопреобразователей УЗ излучателей;
- компенсировать потери энергии при распространении электрических колебаний от электронного генератора до пьезопреобразователя УЗ излучателя в длинном (более 100 м) соединительном кабеле или линии связи;
- компенсировать потери на излучение (снижение плотности газовой среды) с учетом условий эксплуатации УЗ излучателей при высокой температуре (до 170 °С).

III. ТЕОРИЯ

Оценка потерь на излучение в условиях эксплуатации ультразвуковых излучателей при высокой температуре.

Одной из возможных причин снижения эффективности работы УЗ излучателей является снижение вводимой акустической мощности при повышении температуры до рабочей температуры в ЗУУ – 170 °С.

Волновое сопротивление газовой среды определяется температурой среды:

$$\rho(T)c(T) = \frac{\rho M}{RT} \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} = p \sqrt{\frac{\gamma M}{RT}}; \quad (1)$$

где ρ – плотность отходящих газов, кг/м³; c – скорость звука в отходящих газах, м/с; M – молярная масса газов, моль; R – универсальная газовая постоянная, 8,31 Дж/(моль·К); T – температура отходящих газов, К; γ – показатель адиабаты отходящих газов.

Акустическая мощность, вводимая в газовую среду одним излучателем, определялась по формуле:

$$P_{ак}(T) = \int_s \frac{\rho(T)c(T)\omega^2 A^2}{2} \delta S = \rho(T)c(T) \int_s \frac{\omega^2 A^2}{2} \delta S; \quad (2)$$

ω – круговая частота колебаний, с⁻¹; A – амплитуда нормальных колебаний УЗ излучателя, м.

Предполагая, что амплитуда и частота нормальных колебаний не зависят от температуры, мощностные потери (%) определились как:

$$\xi = \left(1 - \frac{P_{ак}(T_2)}{P_{ак}(T_1)}\right) \cdot 100\% = \left(1 - \frac{\rho(T_2)c(T_2)}{\rho(T_1)c(T_1)}\right) \cdot 100\% = \left(1 - \sqrt{\frac{T_1 + 273K}{T_2 + 273K}}\right) \cdot 100\%; \quad (3)$$

где ξ – потери акустической мощности, %; t_1 – комнатная температура, °С; t_2 – температура отходящих газов, °С

Таким образом было установлено, что повышение температуры приводит к снижению волнового сопротивления среды при поддержании постоянного давления. При изменении температуры отходящих газов от 20°С до 170°С мощностные потери составят 18,7% или 0,74 дБ.

Оценка потерь в линии связи

Для определения величины электрических потерь в линии связи, электронный генератор, при помощи проводной линии связи (ЛС) подключался к УЗ излучателю, нагретому до рабочей температуры в 170 °С. Для компенсации нагрева пьезоэлектрического преобразователя УЗ излучателя использовался конструктивный элемент в виде проточного объема, который охлаждался водопроводной водой с температурой 12 – 20 °С и расходом не более 2 л/мин.

В качестве линии связи был использован провод марки КВВГ 4х1,5 со следующими параметрами:

- погонная индуктивность: $L_э = 0,3$ мкГ/м;
- погонная емкость: $C_э = 0,16$ нФ/м;
- протяженность линии: $L=100$ м.

Для расчета потерь в линии связи $\Delta P\%$ (выраженных в %) использовалось следующее выражение:

$$\Delta P\% = \frac{\Delta P \cdot 100}{P_0}, \quad (4)$$

где ΔP – потери в линии связи, выраженные в ваттах, при потребляемой мощности аппаратом от электрической сети P_0 , измерявшиеся при помощи измерителя параметров потребителей электрической энергии Power Analyzer MT1010

Потери в линии связи ΔP составили разность мощностей на входе P_1 и выходе линии связи P_2 :

$$\Delta P = P_1 - P_2. \quad (5)$$

Для расчета мощностей P_1 , P_2 были использованы следующие выражения:

$$P_1 = U_1 I_1 \cos(\varphi_1), \quad (6)$$

$$P_2 = U_2 I_2 \cos(\varphi_2), \quad (7)$$

где U_1, I_1, φ_1 – действующие значения напряжения и тока на входе в ЛС, а так же сдвиг фаз между ними, U_2, I_2, φ_2 – действующие значения напряжения и тока на выходе ЛС, а так же сдвиг фаз между ними. Для измерения напряжений, токов, а так же сдвига фаз между ними на входе и выходе ЛС использовался цифровой осциллограф Instek GDS-71022. Для измерения токов ЛС была дополнена токовыми датчиками R_s на входе и на выходе, как показано на Рис. 1.

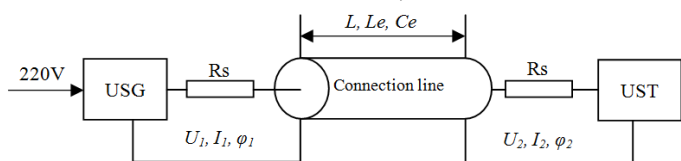


Рис. 1. Линия связи УЗКС с электронным генератором (УЗГ)

В результате серии измерений были получены данные, представленные в Табл. 1.

ТАБЛИЦА I
РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Потребляемая мощность P_0 , Вт	Мощность на входе ЛС P_1 , Вт	Мощность на выходе ЛС P_2 , Вт	Потери в ЛС, Вт	Потери в ЛС, %
180	94	58	36	20

Величина уровня звукового давления (уменьшение уровня звукового давления), соответствующая 20% потере мощности в линии связи, составляет 0,79 дБ.

Итак, наличие потерь (18,7%) при излучении в разогретый до 170 °С объем и так же потерь в линии связи (20%) обуславливают необходимость, как минимум, их компенсации. В мощностном эквиваленте эти потери в сумме составляют около 70 Вт.

IV. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Наличие линии связи является не только источником активных потерь, но, при наличии погонной емкости и индуктивности, является причиной рассогласования УЗ излучателя и электронного генератора аппарата. В связи с этим для компенсации влияния линии связи на работу аппарата:

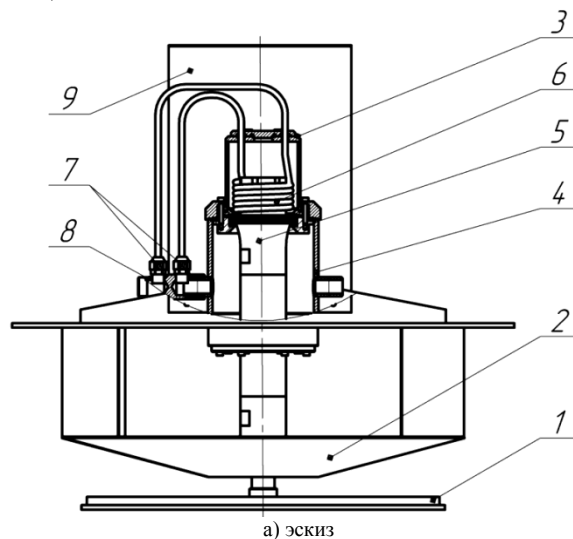
- был перестроен УЗ генератора для ввода в линию связи большей электрической мощности;
- была осуществлена настройка аппарата (корректировка параметров элементов системы согласования электронного генератора с удаленно подключенному УЗ излучателю) с учетом погонных параметров (погонная емкость и индуктивности) линии связи;

Основная проблема, связанная с увеличением мощности аппарата связана с:

- вероятностью механического разрушения элементов УЗ излучателя;
- выходом из строя пьезопреобразователя УЗ излучателя из-за его перегрева в процессе эксплуатации на повышенной мощности.

Последовательное увеличение в ходе экспериментов мощности аппарата от номинального значения в 180 Вт показало невозможность стабильной работы на мощностях выше 230 Вт, поскольку наблюдается разогрев пьезоэлектрического преобразователя УЗ излучателя до критических температур (более 120 °С), что обуславливает нестабильность параметров аппарата в целом, выход его из строя.

Для увеличения мощности в конструкцию УЗ излучателя, последовательно с охлаждающим объемом, был включен дополнительный охлаждающий контур пьезопреобразователя. Полученная конструкция приведена на Рис. 2, а.



а) эскиз



б) внешний вид

- 1 – дисковый излучатель; 2 – отражатель; 3 – корпус;
 4 – охлаждающий объем; 5 – пьезопреобразователь;
 6 – медная трубка; 7 – штуцера; 8 – разделитель; 9 – защитный кожух
 Рис. 2. Модернизированный излучатель

Для улучшения отвода тепла от пьезоэлектрических элементов преобразователя вокруг них был намотан охлаждающий контур из медной трубки (поз. 6). Внутреннее пространство корпуса излучателя (поз. 3) заполнено электроизоляционным теплопроводящим компаундом КПТД-1/1Т-8.50. Доработанный корпус (поз. 3) и применяемые резиновые уплотнения обеспечивают герметичность корпуса УЗ излучателя. Защитный кожух (поз. 9) предотвращал повреждение медной трубки при монтаже/демонтаже излучателя, а также и при транспортировке.

Подаваемый жидкий теплоноситель (водопроводная вода) первоначально поступала в разделитель (поз. 8), затем в контур охлаждения пьезопреобразователя, и только потом – в охлаждающий объем. Контур охлаждения был выполнен из медной трубки (внешний диаметр 6 мм, толщина стенки 1 мм).

Внешний вид модернизированной конструкции излучателя показан на Рис. 2, б.

Охлаждение проточной водопроводной водой (входная температура 20 °С, расход 2 л/мин, избыточное давление 1 атм.) позволило обеспечить стабильную работу ультразвукового излучателя в диапазоне температур от 100 °С до 200 °С и добиться стабильной работы аппарата на мощности 330 Вт.

V. ПРОВЕДЕННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

В Табл. 2 представлены результаты серии измерений звукового давления в процессе работе аппаратов для УЗ коагуляции в специализированном тепловом шкафу (при температуре 170 градусов) на мощностях 180 (было до) и 330 Вт (максимальное допустимое значение для модернизированной системы охлаждения). Контроль уровня звукового давления осуществлялся в точках № 1, 2, 3 (Рис. 3).

ТАБИЛЦА II
 MEASUREMENTS RESULTS FOR SINGLE OPERATING ULTRASONIC
 EMITTERS

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ КАЖДОГО УЗ ИЗЛУЧАТЕЛЯ В ОТДЕЛЬНОСТИ

Мощность, Вт		Точка №1		Точка №2		Точка №3		Прирост уровня звукового давления, дБ
		180	330	180	330	180	330	
Уровень звукового давления, дБ	Изл. №1	127,3	129,6	125,9	130,6	123,3	128,7	4,13
	Изл. №2	119,7	123,8	128,1	130,5	121	123,9	3,13
	Изл. №3	120,7	124,3	123,9	126,6	120,9	123,3	2,90
	Изл. №4	116	118,7	121,0	122,2	120,5	121,7	1,70
	Изл. №5	117,3	120,2	118,8	121,3	121,8	124,3	2,63
	Изл. №6	122,9	125,8	125,7	128,2	117,3	119,1	2,40
	Изл. №7	123,1	125,9	125,3	128,0	126	128,1	2,53
	Изл. №8	124,3	127,2	127,2	130,2	128,3	131,3	2,97

Усредненный (по точкам № 1, 2, 3) прирост уровня звукового давления для каждого УЗ излучателя при увеличении мощности от 180 Вт до 330 Вт представлен в последней колонке Табл. 2 и лежит в диапазоне от 1,7 дБ до 4,13 дБ. Результаты измерений показывают, что, даже в очень плохом варианте измерений (не на оси излучения диска в свободном пространстве, а после многократных переотражений и интерференционного ослабления), увеличение мощности аппарата до 330 Вт позволило увеличить интенсивность излучения в газовую среду не менее чем на 3 – 5 дБ (скомпенсировать потери в линии связи и потери связанные с разогревом газовой среды и увеличить интенсивность воздействия).

Для подтверждения полученного увеличения эффективности, далее представлены результаты измерений уровня звукового давления при парном включении излучателей в тепловом шкафу. При этом оценивался уровень звукового давления, как при одновременном включении пары излучателей, так и для каждого излучателя отдельно. Полученные результаты приведены в Табл. 3.

Варианты формирования пар излучателей показаны на схеме, приведенной на Рис. 3.

Узлами на схеме (№1...№8) отмечены установленные в тепловом шкафу излучатели, линиями связи (отрезки между узлами) на схеме показаны возможные варианты объединения ультразвуковых технологических аппаратов в пары, черные точки (Т1, Т2, Т3) – точки измерения уровня звукового давления, формируемого в объеме нагревательной камеры.

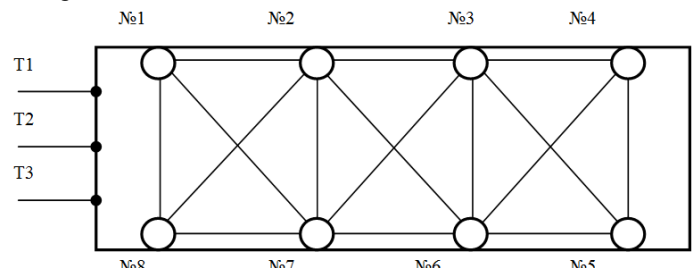


Рис. 3. Схема, поясняющая варианты формирования излучателей в пары для проведения исследований ультразвуковых технологических аппаратов в тепловом шкафу

Узлами на схеме (№1...№8) отмечены установленные в тепловом шкафу излучатели, линиями связи (отрезки между узлами) на схеме показаны возможные варианты

объединения ультразвуковых технологических аппаратов в пары, черные точки (Т1, Т2, Т3) – точки измерения уровня звукового давления, формируемого в объеме нагревательной камеры.

ТАБИЛЦА III

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ УРОВНЯ ЗВУКОВОГО ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ АППАРАТОВ ПРИ ПАРНОМ ВКЛЮЧЕНИИ

Варианты комбинаций	Уровень звукового давления, дБ			Усредненный уровень звукового давления, дБ
	Т1	Т2	Т3	
1 + 2	129,4	133,5	130,7	131,20
1 + 7	130,2	133,0	128,8	130,67
1 + 8	132,6	135,1	134,1	133,93
2 + 3	128,6	133,8	128,6	130,33
2 + 6	124,2	130,6	127,0	127,27
2 + 7	128,6	131,2	129,6	129,80
2 + 8	132,9	133,6	133,8	133,43
3 + 4	126,5	125,6	124,5	125,53
3 + 5	127,0	127,1	125,4	126,50
3 + 6	126,5	127,5	126,7	126,90
3 + 7	130,2	129,0	131,6	130,27
4 + 5	122,2	124,9	123,8	123,63
4 + 6	125,8	124,0	124,3	124,70
5 + 6	126,2	126,6	123,6	125,47
6 + 7	124,7	124,8	128,9	126,13
7 + 8	132,6	132,8	131,1	132,17

Результаты измерений, представленные в Табл. 3, подтверждают, что «суммарный» уровень звукового давления больше, чем уровень ультразвукового давления от отдельно взятого излучателя контролируемой пары. Особенно представительны результаты работы пары излучателей, расположенных вблизи точек измерений (увеличение более чем на 4 дБ при работе пары излучателей)

VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный комплекс работ по повышению эффективности ультразвуковых излучателей, предназначенных для коагуляции в золоулавливающих установках ТЭЦ, позволил увеличить мощность каждого аппарата, используемого в технологическом процессе с 180 Вт до 330 Вт за счет применения системы водяного охлаждения пьезопреобразователя и компенсации потерь в длинной (до 100 м) линии связи. За счет этого интенсивность ультразвукового воздействия каждого УЗ излучателя удалось увеличить на 3 – 5 дБ, что обеспечило повышение знакопеременного давления в зоне воздействия не менее, чем в 2 раза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, С.Н. Цыганок, Р.В. Барсуков, К.В. Шалунова. Применение ультразвуковых колебаний высокой интенсивности для интенсификации процессов в газовых средах // Химическая техника. – 2010. – № 1. – С. 23–28.
- [2] V.N. Khmelev, A.V. Shalunov, K.V. Shalunova, A.V. Shalunova, A.A. Antonnikova. Study of possibility of ultrasonic coagulation in air flow // EDM-2012. International Conference and Seminar on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices EDM'2012: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2012. – P. 183–187.
- [3] В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, С.С. Хмелев, С.Н. Цыганок. Ультразвук. Аппараты и технологии: монография. – Бийск: Изд-во Алтайского гос. технич. ун-та, 2015. – 688 с.
- [4] Tsyganok S.N., Galakhov A.N., Khmelev V.N., Lebedev A.N., Shalunov A.V. Ultrasonic Coagulation on the Basis of Piezoelectric Vibrating System with Focusing Radiator in the form of Step-Variable Plate // International Conference and Seminar on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices.

EDM'2010: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2010. – P. 376–379.

- [5] V.N. Khmelev, A. N. Galakhov, A. V. Shalunov, A.V. Shalunova. Designing of multi-frequency source of ultrasonic action with radiator in form of stair-step disc // 15th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2014: Novosibirsk, NSTU, 2014. – P 194 -198
- [6] V.N. Khmelev, A.V. Shalunov, V.A. Nesterov, R.S. Dorovskikh, R.N. Golykh. Ultrasonic radiators for the action on gaseous media at high temperatures // 16th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2015: Novosibirsk, NSTU, 2015. – P 224 - 228
- [7] V.N. Khmelev, A.V. Shalunov, V.A. Nesterov, R.N. Golykh, R.S. Dorovskikh, V.E. Bazhin. Efficiency increase of centrifugal separation of gas-dispersed flow by the application of ultrasonic vibrations // 17th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2016: Novosibirsk, NSTU, 2016. – P 269- 274.