ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР И ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ДИСКОВЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ГАЗОВЫЕ СРЕДЫ

В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, В.А. Нестеров, Р.С. Доровских, Р.Н. Голых

Статья посвящена выбору параметров ультразвуковых дисковых излучателей для обеспечения максимального по энергетической эффективности воздействия на процессы в газовых средах при температуре до 200 °C. Представлены результаты исследований влияния температуры на частотные и энергетические характеристики пьезоэлектрических преобразователей с излучателями в виде изгибно-колеблющихся титановых дисков, позволившие установить зависимости рабочей частоты, амплитуды колебаний поверхности дискового излучателя и уровня формируемого звукового давления от температуры обрабатываемой среды.

Ключевые слова: ультразвуковая коагуляция, ультразвуковой дисковый излучатель, пьезоэлектрический преобразователь, очистка отходящих газов.

ВВЕДЕНИЕ

Воздействия ультразвуковыми (УЗ) колебаниями высокой интенсивности позволяют интенсифицировать разнообразные технологические процессы, протекающие в средах, находящихся в различных агрегатных состояниях. В последние годы эффективно развиваются технологии, основанные на применении ультразвукового воздействия для коагуляции дисперсных частиц в отходящих газах тепловых станций и промышленных предприятий. При этом температура таких газов может составлять 150-200 °C [1, 2]. Поэтому возникает потребность в разработке и применении излучателей, способных создавать в газовой среде при высоких температурах УЗ колебания с уровнем звукового давления не менее 150 дБ [3].

РАЗРАБОТКА УЗ ДИСКОВОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ С СИСТЕМОЙ ОХЛАЖДЕНИЯ

Для создания УЗ колебаний высокой интенсивности в газовых средах наиболее эффективными являются пьезоэлектрические ультразвуковые колебательные системы (УЗКС) с излучателями в виде изгибноколеблющихся титановых дисков [4]. Для проведения исследований был разработан излучатель в виде диска диаметром 370 мм. Форма излучателя и распределение амплитуды его колебаний показаны на рисунке 1.

Для обеспечения воздействия на газодисперсный поток излучающий элемент (диск) должен находиться в технологическом объеме, в котором происходит ультразвуковая обработка газодисперсного потока. Таким образом, излучающий элемент находится под непосредственным влиянием высокой температуры [5].



Рисунок 1 – Форма колебаний УЗ дискового излучателя диаметром 370 мм

При этом остальные элементы колебательной системы (пьезоэлектрический преобразователь, волновод и концентратор) могут находиться во внешней среде и не подвергаться прямому воздействию нагретого газодисперсного потока. Однако тепловое воздействие на всю систему от излучателя осуществляется посредством теплопроводности материалов элементов УЗКС. Термозависимыми элементами УЗКС являются пьезокерамические элементы, обеспечивающие за счет пьезоэффекта преобразование электрических колебаний в ультразвуковые. Пьезоматериал сохраняет свои свойства только при температурах ниже температуры Кюри. Кроме того, при повышении температуры ухудшаются его преобразовательные свойства (снижается коэффициент электромеханического преобразования), увеличивается электрическая емкость и возрастают диэлектрические потери [6]. Это приводит к умень-

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 1 2016

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР И ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ДИСКОВЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ГАЗОВЫЕ СРЕДЫ

шению амплитуды колебаний преобразователя при постоянном напряжении на нем. Поэтому возникает задача отвода тепла для стабилизации температурного режима пьезоэлектрического преобразователя.

Так как площадь поверхностей элементов УЗКС недостаточна для эффективного воздушного охлаждения пьезоэлементов, создаются УЗКС с жидкостным охлаждением. Поэтому для обеспечения оптимального температурного режима работы пьезопреобразователя создана система охлаждения, обеспечивающая непрерывный режим работы колебательной системы, излучатель которой находится под воздействием газа с высокой температурой.

Конструкция пьезоэлектрической колебательной системы, позволяющей осуществить установку жидкостной системы охлаждения, представлена на рисунке 2.



 1 – источник ультразвукового давления в виде диска; 2 – концентратор 3 – волновод;
4 – пьезоэлектрический преобразователь;
5 – пьезокерамические кольца;
6 – кольцевые кронштейны
Рисунок 2 – УЗКС с дисковым излучателем

Дисковый излучатель изготовлен по ранее разработанным авторами методикам, изложенным в работах [4, 7, 8].

Для поддержания температуры пьезокерамических элементов в рабочем диапазоне (не более 70 °C) [6] в конструкции колебательной системы предусмотрен дополнительный (промежуточный) отрезок волновода 3 для установки узла тепловой отсечки, обеспечивающего жидкостное охлаждение преобразователя 4 в процессе эксплуатации. Кольцевые кронштейны 6, выполненные на волноводе 3 и пьезоэлектрическом преобразователе 4 (рисунок 2), необходимы для установки и герметизации охлаждающего объема. Эскиз разработанной УЗКС в сборе с охлаждающим объемом представлен на рисунке 3.

Для крепления излучателя к озвучиваемому объему (например, газоходу) предусмотрен фланец 5. Таким образом, область А ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 1 2016 находится под воздействием газа с высокой температурой, а область *Б* – во внешней среде при оптимальной рабочей температуре.

Для проверки эффективности узла тепловой отсечки проведены расчеты тепловых режимов работы УЗКС с помощью системы конечно-элементного моделирования. Так как область А находится под воздействием отходящих газов, то при анализе температурного режима УЗКС в качестве начальных условий температура дискового излучателя и концентратора задана равной максимальной температуре отходящих газов в энергетических установках (200 °C). В области Б элементы УЗКС находятся в контакте с охлаждающей жидкостью (ОЖ) (температура поверхностей УЗКС, контактирующих с ОЖ – 30 °С). Был рассчитан предельный режим работы, когда вся энергия электронного генератора переходит в тепло, нагревая колебательную систему за счет внутренних потерь в материалах элементов УЗКС (мощность электронного генератора -250 Вт). Полученная картина распределения температуры показана на рисунке 4.



 УЗКС с дисковым излучателем;
теплообменник; 3 – патрубки подачи и отвода охлаждающей жидкости; 4 – корпус пьезоэлектрического преобразователя;
фланец для монтажа в энергетическую установку

Рисунок 3 – Эскиз разработанной УЗКС с теплообменником



Рисунок 4 – Результаты расчета теплового режима УЗКС с жидкостным охлаждением

В результате моделирования процесса нагрева было установлено, что повышение температуры дискового излучателя, концентратора и половины волновода (до кольцевых кронштейнов (рисунок 2 поз.6)) за счет воздействия на него нагретого газа эквивалентно источнику тепла, воздействующего на область *Б* с мощностью 300 Вт. Таким образом, общая мощность нагрева составила не более 550 Вт при температуре газов 200 °C.

Анализ результатов моделирования показал, что применение жидкостного охлаждения пьезопреобразователя и волновода обеспечивает установление стационарного температурного режима за время не более 1000 секунд. При таком режиме пьезокерамические элементы нагреваются до температуры не более 75 °C.

. Расчет расхода ОЖ производится по известному выражению:

$$Q_{wtr} = \frac{P}{c(T_{Out} - T_{ln})}$$
(1)

где Q_{wtr} – расход ОЖ, кг/с; *P* – эквивалентная мощность нагрева ОЖ, Вт; *с* – удельная теплоемкость, Дж/кг/К; *T*_{In}, *T*_{Out} – температура ОЖ на входе и выходе соответственно, К.

Проведенные расчеты позволили получить зависимости расхода ОЖ (воды) от температуры на входе при различной эквивалентной мощности нагрева (рисунок 5).



Рисунок 5 – Зависимости расхода от температуры воды на входе при различных мощностях нагрева

На практике для обеспечения заданного температурного режима колебательной системы расход воды устанавливается таким образом, чтобы температура ОЖ на выходе из узла тепловой отсечки не превышала 30 °С (температура, заданная в начальных условиях при моделировании).

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ АМПЛИТУД КОЛЕБАНИЙ ИЗЛУЧАТЕЛЯ

Дальнейшие исследования были направлены на установление влияния на характеристики дисковых излучателей (резонансная частота, уровень звукового давления, потребляемая мощность и распределение амплитуд колебаний поверхности дискового излучателя) при высокой температуре рабочей среды.

На первом этапе были проведены измерения амплитуд колебаний на поверхности излучателя при температуре 20 °C. Эти данные необходимы для сопоставления с результатами измерений, полученными при исследовании распределения при высокой температуре и оценки влияния температуры на эффективность дискового излучателя.

Для исследования распределения амплитуд колебаний на поверхность диска были нанесены две диаметральные прямые линии, на которых были отмечены исследуемые точки и нули колебаний. На рисунке 6 приведена схема нумерации точек, по которым проводились измерения значений амплитуд колебаний.



Рисунок 6 – Схема нумерации точек и значения амплитуд и исследуемых точках

Для исследования влияния температуры рабочей среды на основные параметры УЗ излучателя был разработан стенд, показанный на рисунке 7.

Измерения проводились с помощью разработанного стенда, показанного на рисунке 8 при температуре излучателя 20 °С.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР И ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ДИСКОВЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ГАЗОВЫЕ СРЕДЫ



 фланец с охлаждающим объемом;
цилиндрическая обечайка; 3 – крышка (снята); 4 – УЗКС с дисковым излучателем; 5 – нагревательные элементы
Рисунок 7 – Фотография стенда для нагрева и измерения амплитуд колебаний поверхности дискового излучателя

Стенд состоял из теплоизолированной цилиндрической рабочей камеры диаметром 450 мм и высотой 400 мм, выполненной из негорючего материала, в которую была установлена УЗКС с охлаждающим объемом. Нагрев внутреннего объема камеры осуществлялся с помощью ламп накаливания. В качестве ОЖ для УЗКС использовалась вода.



 индикатор перемещений часового типа (цена деления шкалы 1 мкм);
ультразвуковой дисковый излучатель;
полозья
Рисунок 8 – Стенд для проведения измерений амплитуд колебаний

По мере нагрева с помощью электронного генератора автоматически производился контроль и подстройка резонансной частоты. Полученная зависимость резонансной частоты от температуры показана на рисунке 9.



Как видно из графика, резонансная частота практически линейно снижается с повышением температуры. Установлено, что для обеспечения работы излучателя при температурах до 200 °С необходимо обеспечить диапазон перестройки электронного генератора в пределах 1 кГц.

Далее была определена зависимость уровня звукового давления от температуры (рисунок 10). Уровень звукового давления измерялся на оси симметрии дискового излучателя на расстоянии 1 м от поверхности дискового излучателя и на расстоянии, соответствующем интерференционному максиму в ближней зоне излучателя (0,25 м).



Рисунок 10 – Зависимость уровня звукового давления от температуры дискового излучателя

Анализ зависимостей (рисунок 10) позволил установить, что уровень звукового давления уменьшается с увеличением температуры. В интерференционном максимуме снижение составляет 6 дБ (с 158 дБ при комнатной температуре до 152 дБ при температуре 200 °C). Понижение уровня звукового давления связано с уменьшением плотности нагретого газа при его нагревании.

Для определения влияния температуры излучателя на распределение амплитуд колебаний были проведены изменения амплитуды колебаний поверхности диска.

Предварительные измерения показали, что при повышении температуры дискового излучателя форма нулей колебаний остается в виде колец, т.е. характер распределения колебаний не изменяется.

Это свидетельствует о том что, для определения значений амплитуд колебаний излучателя необходимо провести измерения в нескольких точках. В остальных областях амплитуда колебаний изменяется пропорционально.

Для проверки данного предположения были проведены измерения по четырем точкам в соответствие со схемой нумерации (рисунок 6). Полученные зависимости амплитуды колебаний поверхности дискового излучателя в указанных точках от температуры дискового излучателя представлены на рисунке 11.



Рисунок 11 – Зависимость амплитуды колебаний поверхности дискового излучателя от температуры дискового излучателя

Анализ зависимостей позволяет установить, что в рассматриваемых точках повышение температуры дисковых излучателей приводит к пропорциональному существенному (до 8 мкм) увеличению амплитуд колебаний дискового излучателя.

Таким образом, предположение о том, что снижение уровня звукового давления связано с уменьшением плотности нагретого газа верно, т.к. повышение температуры приводит к увеличению амплитуды колебаний дискового излучателя, что в свою очередь при нормальных условиях приводит к повышению интенсивности излучения.

Дальнейшие исследования были направлены на определение зависимости потребляемой аппаратом мощности из сети от температуры излучателя (рисунок 12).



Рисунок 12 – Зависимость потребляемой мощности от температуры дискового излучателя

Как следует из зависимости, при повышении температуры излучателя понижается потребляемая аппаратом мощность. Основная причина заключается в уменьшении степени демпфирования дискового излучателя газом при снижении плотности газа и снижении выхода акустической энергии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований установлены зависимости рабочей частоты, амплитуды колебаний поверхности дискового излучателя и уровня формируемого звукового давления от температуры обрабатываемой среды для обеспечения максимального по энергетической эффективности воздействия на процессы в газовых средах при температуре до 200 °C.

Проведенные исследования позволили определить минимальный расход воды (20–40 кг/час), требующийся для охлаждения и обеспечения непрерывной работы разработанной УЗКС.

Установлено, что необходимый для оптимальной работы аппарата диапазон перестройки частоты генератора не превышает 1 кГц.

Экспериментальные исследования показали, что повышение температуры обрабатываемой среды и излучателя с 20 до 200 °С приводит к снижению уровня звукового давления с 158 дБ до 152 дБ при снижении потребляемой мощности с 182 до 158 Вт.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-38-60082 мол а дк.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шиляев, М. И. Интенсификация тепломассообмена в дисперсных средах при конденсации и испарении / М. И. Шиляев, Е. М. Хромова, А. Р. Богомолов; научн. ред. М. И. Шиляев. – Томск : Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2010. – 272 с.

2. Штокман, Е. А. Очистка воздуха [Текст] / Е. А. Штокман. – М. : Изд-во АСВ, 1999. – 319 с.

3. Хмелёв, В. Н. Моделирование процессов коагуляции газодисперсных систем для определения оптимальных режимов акустического воздействия / В. Н. Хмелёв, А. В. Шалунов, Р. Н. Голых, К. В. Шалунова // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2010. – № 2. – С. 48–52.

4. Khmelev, V. N. Multifrequency Ultrasonic Transducer with Stepped-Plate Disk / A. N. Galahov, A. V. Shalunov, V. N. Khmelev, S. N. Tsyganok, S. S. Khmelev, A. N. Lebedev, K. V. Shalunova // International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. EDM/2009: Conference Proceedings. – Novosibirsk : NSTU, 2009. – P.250–253.

5. Khmelev, V. N. Increase of separation efficiency in the inertial gas-purifying equipment by high-intensity ultrasonic vibrations [Tekct] / V. N. Khmelev, A. V. Shalunov, V. A. Nesterov, R. N. Golykh, R. S. Dorovskikh // International Conference and Seminar on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices EDM'2014: Conference Proceedings. – Novosibirsk : NSTU, 2014. – P. 233–239.

6. Хмелев, В. Н. Исследование влияния температуры на параметры ультразвуковых колебательных систем / В. Н. Хмелев, Р. В. Барсуков, Е. В. Ильченко // Южно-Сибирский научный вестник. – 2013. – № 2(4). – С. 46–49.

7. Хмелев, В. Н. Разработка пьезоэлектрических ультразвуковых колебательных систем для интенсификации процессов в газовых средах [Текст] / В. Н. Хмелев, С. С. Хмелев, А. В. Шалу-ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 1 2016

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР И ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ДИСКОВЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ГАЗОВЫЕ СРЕДЫ

нов, С. Н. Цыганок, А. Н. Лебедев, А. Н. Галахов // Известия Тульского Государственного университета, серия: технические науки. – 2010. – Вып. 1. – С. 148–153.

8. Хмелев, В. Н. Проектирование и моделирование ультразвуковых колебательных систем [Текст] / В. Н. Хмелев [и др.] // Измерения, автоматизация и моделирование в промышленных и научных исследованиях: межвузовский сборник / под ред. Г. В. Леонова. – Бийск, 2003. – С. 211–216.

Хмелев В.Н. – д.т.н., директор по научной работе, МИП ООО «Центр ультразвуковых технологий АлтГТУ», тел.: (3854) 432581, e-mail: vnh@bti.secna.ru.

Шалунов А.В. – д.т.н., зам. директора по научной работе, МИП ООО «Центр ультразвуковых технологий АлтГТУ», тел.: (3854) 432570, e-mail: shalunov@bti.secna.ru.

Нестеров В.А. – главный конструктор, МИП ООО «Центр ультразвуковых технологий АлтГТУ», тел. (3854) 432570, e-mail: nva@bti.secna.ru.

Доровских Р.С. – инженер-программист, МИП ООО «Центр ультразвуковых технологий АлтГТУ», тел.: (3854) 432570, e-mail: dorovskih_roman@mail.ru.

Голых Р.Н. – инженер-программист, МИП ООО «Центр ультразвуковых технологий АлтГТУ», тел.: (3854) 432570, e-mail: grn@bti.secna.ru.