

УДК 534.142

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ДИНАМИКИ ТЕРМОАКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ В УСЛОВИЯХ ИМПУЛЬСНО-ДЕТОНАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ ТОПЛИВА

Синицын А. А.

Вологодский государственный технический университет, Вологда, Россия (160000, г. Вологда, ул. Ленина, 15) nee-energo@yandex.ru

Определена актуальность исследования, выявлены основные проблемы формирования методики расчета энергетических устройств, работающих на основе вибрационного сжигания топлива. Сделан выбор и обоснование оптимального направления исследования. С помощью экспериментального оборудования, разработанного на кафедре теплогазоснабжения и вентиляции ВоГТУ, проведена серия испытаний котла пульсирующего горения, в результате чего получен характер изменения давления в камере сгорания во времени. Произведено сопоставление результатов исследования с известными данными разработчиков подобных устройств. Указаны основные направления дальнейших исследований, которые позволят разработать теорию физических процессов, сопровождающихся термоакустическими колебаниями в условиях импульсно-детонационного горения топлива. Исследования проведены при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках Государственного задания высшим учебным заведениям на 2012 в части проведения научно-исследовательских работ (шифр заявки 7.2685.2011).

Ключевые слова: импульсно-детонационное горение, органическое топливо, резонатор Гельмгольца, термоакустические колебания.

RESULTS OF THE RESEARCH OF TERMOACOUSTIC OSCILLATIONS DYNAMICS IN PULSE-DETONATION FUEL COMBUSTION

Sinitsyn A. A.

Vologda State Technical University, Vologda, Russia (160000, Vologda, 15 Lenin Str.,) nee-energo@yandex.ru

The article determines the relevance of the research, identifies the main problems of formation of methodology for energy devices calculating that are based on vibration fuel combustion. The choice and justification of the best study areas are given. Using experimental equipment developed at the VSTU department of heat and gas supply and ventilation there was conducted a series of intermittent burning boiler tests, resulting in a change in the nature of pressure in the combustion chamber in time. The research results were compared with the known data of the developers of similar devices. The guidelines for further research that will develop a theory of physical processes involving thermoacoustic oscillations in pulse-detonation fuel combustion are pointed. The research is conducted with the assistance of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the framework of the State's instructions to the institutions of higher education for 2012 in the part of research work (application code 7.2685.2011).

Keywords: pulse-detonation combustion, fossil fuel, Helmholtz resonator, thermoacoustic oscillations.

Введение. Актуальность проблемы повышения эффективности работы источников теплоты является бесспорным аргументом при разработке новых теплогенерирующих устройств и модернизации существующих. Техническое повышение мощности горелочного устройства, применение топлив с повышенным тепловыделением при сгорании, увеличение поверхности теплопередачи – методы, не всегда выполнимые и зачастую высокочрезвычайно затратные. Поэтому необходимо развитие теплотехники по новым и более эффективным путям технического развития и экологической безопасности [1]. В этом направлении весьма перспективным представляется реализация в теплоэнергетических установках процессов пульсирующего горения.

В настоящее время, во многих странах ведутся интенсивные исследования в области проектирования и внедрения в технологические процессы теплоэнергетических установок на основе пульсирующего горения. Однако широкое внедрение устройств пульсирующего горения в технологические процессы сдерживается отсутствием надежной теории рабочего процесса для расчета конструктивных параметров при их проектировании, а также поверочного расчета для определения эффективности их работы [2].

Исследования, проводимые к.т.н. Сеницыным А. А. под руководством д.т.н., проф. Игониной В. И. в работах [1–5] показали, что наиболее эффективным в области устройств пульсирующего горения являются аппараты, основанные на принципе автоколебательной системы типа резонатора Гельмгольца.

Постановка задачи и методы исследования. Основной задачей исследования является изучение нестационарных процессов, происходящих в ходе вибрационного горения в камере сгорания котла для разработки методики расчета и нового конструкторского решения по созданию энергоэффективной системы импульсно-детонационного сжигания топлива, организуемого в жаротрубном водогрейном котле типа камеры Гельмгольца.

Для решения поставленной задачи применены методы моделирования нестационарных процессов переноса тепла и массы в элементах промышленных теплоэнергетических систем на основе системного подхода, методы имитационного моделирования и планирования эксперимента.

Описание процесса термоакустических колебаний. К одним из наиболее важных параметров, определяющих волновой процесс, относятся передаточные функции, представляющие собой соотношения колебаний давления и скорости на входе и выходе из канала. Это комплексные функции, которые зависят от фазовой скорости распространения волн давления и коэффициента затухания [6].

$$v(x, \tau) = v_m \sin(\omega\tau) e^{\omega kx}, \quad (1)$$

$$p(x, \tau) = -c_0 \rho_0 P_m \cos\left(\omega\tau + \frac{\pi}{2}\right) e^{\omega kx}. \quad (2)$$

Здесь для характеристики волнового периодического процесса введены общие тригонометрические гармонические функции. Определено, что граничными условиями математической модели является некоторая гармоническая функция f , которая будет определять поведение распределения волновых параметров во времени и пространстве.

Расчетно-экспериментальное исследование термоакустических эффектов проведено на основании предполагаемого акустического приближения к теории резонансных колебаний при колебаниях газа в цилиндрической трубе, на одном конце которой по гармоническому

закону колеблется «термодинамический» поршень – микровзрывы газовой смеси, другой конец трубы открыт и связан с атмосферным воздухом.

В связи с тем, что экспериментальным путем возможно определение давления, то обработка данных производилась именно для этого волнового параметра. К моменту проведения эксперимента имелись следующие представления [6, 7] о гидрогазодинамике в КПП на основе резонатора Гельмгольца:

- 1) временной периодический процесс характеризуется синусоидальной кривой типа $\sin(\omega t)$;
- 2) период колебаний определен геометрическими размерами резонатора;
- 3) теоретически сформулирован принцип действия КПП с привязкой к импульсной диаграмме.

Задачами исследования стали:

1. Выяснение частотно-импульсного характера распространения волны в координатах P- τ ;
2. Тарирование исходного сигнала в единицах давления;
3. Определение экстремумов колебаний давления.

Описание экспериментальной установки. На рис.1. изображена схема проведения измерений параметров состояния теплообменного устройства.

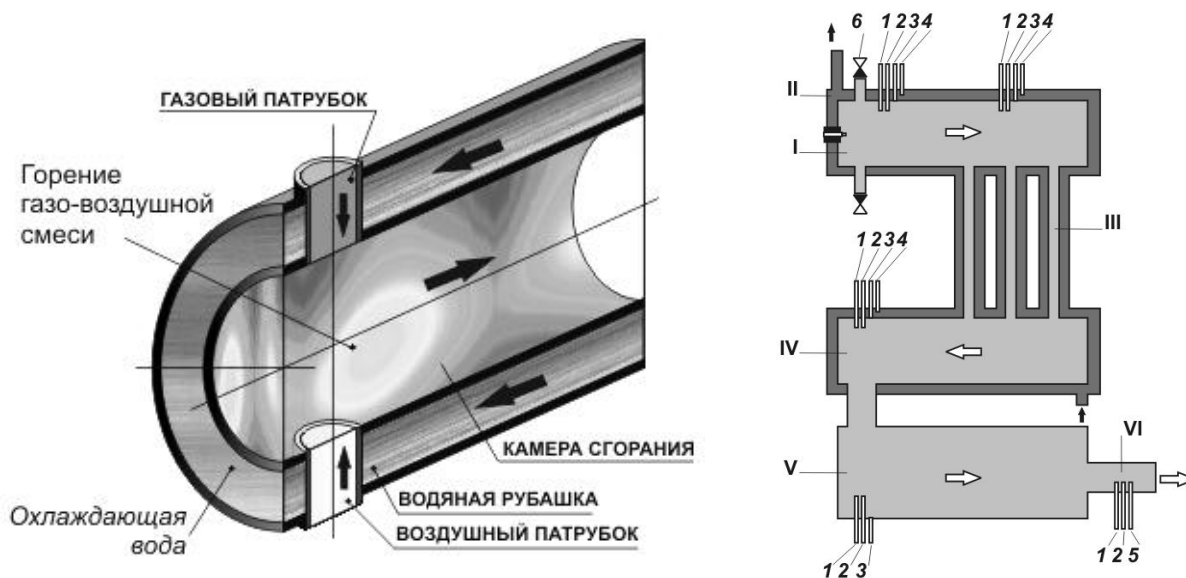


Рис.1. Схема комплексных измерений на объекте исследования

I – камера сгорания; II – водяная рубашка; III – резонансные трубы; IV – резонаторный ресивер; V – глушитель выхлопа; VI – дымовая труба; 1 – камера сгорания; 2 – водяная рубашка; 3 – резонансные трубы; 4 – резонаторный ресивер; 5 – глушитель выхлопа; 6 – дымовая труба; точки измерения: 7 – давление в дымовых газах; 8 – температура дымовых газов; 9 – температура разделяющей металлической стенки; 10 – температура охлаждающей

воды в водяном тракте; 11 – газовый анализ состава продуктов сгорания на выходе из котла;
12 – давление в топливной линейке

Оборудование измерения параметров включало в себя устройства для преобразования механической энергии изменения давления в камере в электрический сигнал, а также устройства для тарировки и оцифровки сигнала. Для определения частотно-импульсного характера распространения волны вся измерительная система была акустически изолирована от возможных шумовых наложений на исследуемый звуковой сигнал. Звуковой сигнал преобразовывался в электрический и выводится на ПК. Для определения амплитуд колебаний была проведена тарировка сигнала в единицы измерения давления.

Проведение эксперимента и обработка экспериментальных данных. Эксперимент проводился на действующей установке КПП при следующих условиях:

- Давление в газовом патрубке p_2 – 102 кПа;
- Давление в воздушном патрубке p_{am} – 100 кПа (атмосферное давление);
- Расход топлива B – 36 м³/ч;
- Коэффициент избытка воздуха α – 1,25;
- Частота резонансная f – 33 Гц.

Измерялись следующие параметры:

- моментальное значение давления дымовых газов в газовом тракте;
- амплитуды изменения давления во времени.

Обработка результатов эксперимента на объекте исследования проводилась в три этапа:

- получение исходного сигнала с обработкой с помощью звуковой программы до состояния расчетного;
- математическая обработка звукового сигнала в периодический процесс;
- определение значений амплитуд колебаний (тарирование сигнала).

Подготовка к математической обработке звукового файла произведена с помощью звуковой программы Sound Forge 4.5. Получено, что период газовой волны в среднем составляет 6 периодов звуковых периодов. Математическая обработка звукового файла производилась с помощью программы MathCAD 11 Enterprise Edition и дополнительным пакетом Signal Processing, предназначенной для обработки звуковых сигналов [5]. Было произведено считывание сигнала из звукового файла, получение полной информации о нем и построение исходного графика сигнала.

Результаты испытаний. В результате приведенных операций получены эмпирические зависимости изменения давления в течение одного цикла. Для сравнения основные экспериментальные характеристики соотнесены с результатами аналогичных

экспериментов, проводимых корейскими исследователями [42] на камере Гельмгольца с аэродинамическим клапаном. Измерение динамики изменения давления проводилось с помощью пьезоэлектрических преобразователей давления, устанавливаемых на стенке камеры сгорания опытной установки PCS (Pulsating Combustion System), что существенно сказывалось на погрешности замера. Результаты двух экспериментов сведены в табл.1.

Таблица 1

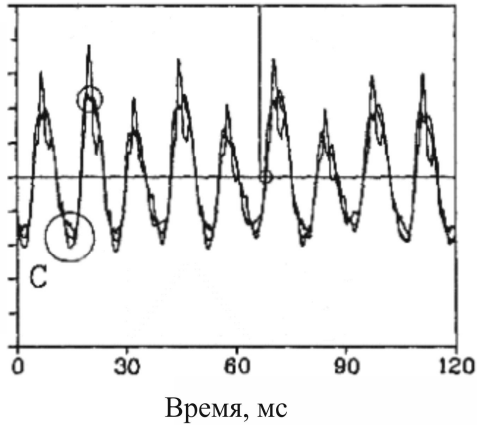
Результаты экспериментов по исследованию гидродинамических параметров в КПП

| № п/п | Величина | Значение для установки | |
|----------------------------------|---|------------------------|--------|
| | | PCS | ПВ-400 |
| 1 | Расход топлива, м ³ /ч | 0,33 | 36 |
| Геометрические характеристики | | | |
| 2 | Объем камеры сгорания, м ³ | $5,4 \cdot 10^{-4}$ | 0,206 |
| 3 | Объем резонаторных труб, м ³ | $1,7 \cdot 10^{-3}$ | 0,169 |
| 4 | Частота резонансная, Гц | 67 | 33 |
| Гидродинамические характеристики | | | |
| 5 | Максимальная амплитуда, кПа | 113,8 | 111,1 |
| 6 | Минимальная амплитуда, кПа | 93,1 | 91,5 |

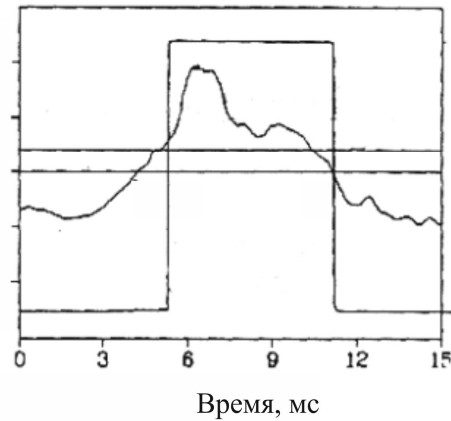
На рис. 2 представлены результаты исследований частотных характеристик исследователями [8] и предлагаемым способом. В виду того, что исследования проводились на двух котлах одинакового принципа действия разными способами измерения давления, видно, что данные, полученные первым способом, несут большие шумовые помехи, что отражается при обработке каждого цикла периодического процесса колебания давления. Эти помехи влияют как на величины амплитуда колебания давления, так и на характер изменения давления во времени, а ошибка измерения повлияет на результат испытания котла и последующие мероприятия по повышению его эффективности.

На основании результатов экспериментального исследования с применением указанного способа процесс изменения давления в тракте котла пульсирующего горения стало возможным представить в виде диаграммы с описанием происходящих при этом процессов (см. рис.2 Б.2).

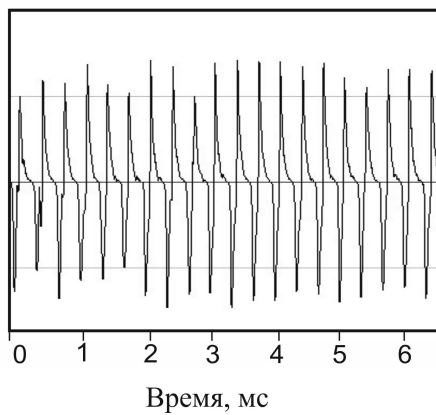
A.1



Б.1



A.2



Б.2

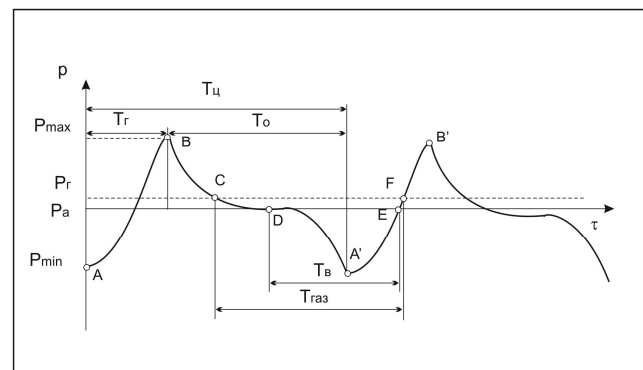


Рис. 2. Результаты исследований частотных характеристик

A.1 и A.2 – фрагменты колебаний давления в котле PCS и ПВ-400; Б.1 и Б.2 – один цикл процесса вибрационного горения котла PCS и ПВ-400; А-В – увеличение давления в процессе сгорания топливно-воздушной смеси; В-А' – процесс охлаждения дымовых газов; С-F – процесс поступления природного газа через газопульсирующий клапан; D-E – процесс поступления воздуха через воздушно-пульсирующий клапан; А-А' – время 1 цикла (определяется акустическими свойствами резонатора)

Выводы по работе. Проведенные испытания котла импульсно-детонационного сжигания органического топлива позволяют:

- провести экспериментальные исследования особенностей автоколебательного режима;
- разработать режим работы котла с учетом полученной зависимости изменения давления во времени;
- исследовать прототип новой огнетехнической автоколебательной системы, построенной на основе предложенных зависимостей;
- разработать методологию расчета энергоэффективных устройств пульсирующего сжигания топлива и выработки тепловой энергии;

– оценить полноту решения поставленных задач и степень достижения заявленных целей исследования;

– произвести оценку эффективности полученных результатов по сравнению с достигнутым мировым научно-техническим уровнем.

Результатом станет составление прогноза развития направления энергетики на базе импульсно-детонационного горения на основе аналитических материалов и полученных результатов теоретических и экспериментальных исследований. Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках Государственного задания высшим учебным заведениям на 2012 в части проведения научно-исследовательских работ (шифр заявки 7.2685.2011).

Список литературы

1. Влияние вибрационных характеристик на работу котла пульсирующего горения / А. А. Сеницын, В. И. Игонин // Научно-технический справочник. Инженерный журнал. – М.: Издательство Машиностроение, 2006. – №12 (117). – 64 с.
2. Исследование вибрационных характеристик работы котельных агрегатов / А. А. Сеницын // Изв. вузов. Приборостроение. – СПб: Изд-во ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики», 2008. – Т. 51, № 7. – С. 68-71.
3. Исследование особенностей работы котла пульсирующего горения / А. А. Сеницын, В. И. Игонин // Научно-технический журнал "Новости теплоснабжения". – Москва: ООО Издательство "Новости теплоснабжения", 2010. – № 3 (115). – С.24 – 27.
4. Исследование особенностей работы котла, основанного на пульсирующем горении газообразного топлива / А. А. Сеницын // Электронный журнал «Нефтегазовое дело». – Уфа: УГНТУ, 2006. Издатель: Уфимский государственный нефтяной технический университет. Сетевой адрес: <http://www.ogbus.ru>
5. Моделирование процессов в теплогенераторе на основе пульсирующего горения / А. А. Сеницын // Электронный журнал "Исследовано в России". – Москва: МФТИ, 2006. Издатель: Московский Физико-Технический Институт. Сетевой адрес: <http://zhurnal.ape.relarn.ru> N гос. регистрации 042030001.
6. Особенности разработки опытной установки для формирования теории физических процессов, сопровождающихся термоакустическими колебаниями в условиях импульсно-детонационного горения топлива / А. А. Сеницын, П. О. Тимошенко, О. Ю. Никифоров // Фундаментальные исследования. – 2012. – № 3 (часть 2). – С. 409-413.

7. Пульсирующее горение / А. А. Сеницын // Энергия: экономика, техника, экология. – М.: Наука, 2007. – № 1. – 80 с.
8. Keel, S. I. A Study of the Operating Characteristics of a Helmholtz-type Pulsating Combustor / S.I.Keel, Hyun Dong Shin // Institute of Energy. – V. 64, 99. – 1991.

Рецензенты:

Горбунов Вячеслав Алексеевич, д.ф.-м.н., профессор, главный специалист ООО НПФ «ЭнергоКИТ», г. Вологда.

Калягин Юрий Александрович, д.т.н., профессор, главный конструктор Общества с ограниченной ответственностью Научно-производственный центр «Информационные и энергетические технологии» (ООО НПЦ «Инэнтех»), г. Вологда.