

УДК 534.142

ЧАСТОТНО-ИМПУЛЬСНАЯ ДИАГРАММА ИЗМЕНЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ В КАМЕРЕ КОТЛА ВИБРАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ ТОПЛИВА

Синицын А.А.*Вологодский государственный технический университет, Вологда, e-mail: nee-energo@yandex.ru*

Авторами статьи сделаны попытки получить зависимость изменения давления во времени для энергетического устройства типа камеры Гельмгольца. Процесс периодического изменения давления в единичном объеме камеры в виде индикаторной диаграммы разложен на основные составляющие, визуальное показано время срабатывания газовых и воздушных клапанов. 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. Достоверность основных научных положений, выводов и рекомендаций, отраженных в работе, обеспечивается результатами проведения эксперимента на промышленной установке, а также результатами сравнения с известными экспериментальными данными исследователей подобных процессов в теплогенерирующих аппаратах. 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 год в части проведения научно-исследовательских работ (шифр заявки 7.2685.2011).

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

PULSE FREQUENCY CHART OF PRESSURE CHANGE IN THE FUEL INTERMITTENT BURNING BOILER CHAMBER

Sinitsyn A.A.*Vologda State Technical University, Vologda, e-mail: nee-energo@yandex.ru*

The authors attempted to obtain the dependence of pressure change in time for the power device of Helmholtz chamber type. The process of periodic pressure change in the unit chamber volume in the form of the indicator diagram is decomposed into basic components, the time of gas and air valves response is shown visually. 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 reliability of the basic scientific principles, findings and recommendations are reflected in the work, it is provided by the results of an experiment conducted in industrial plant, as well as by the results of the comparison with the known experimental data of researchers of such processes in heat-generating 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

В настоящее время на рынке появилось множество различных источников теплоты с высоким КПД. Многие источники являются принципиально новыми. В них основную роль играют термогидравлические процессы. Именно они определяют качество и результативность превращения различных видов энергии. К таким источникам теплоты относятся котельные агрегаты, в которых гидротермические формы энергии интенсифицируются с помощью искусственно созданных вибраций за счет удачно подобранной геометрии теплообменного устройства [3]. Оценке этого эффекта на реально работающем полупромышленном изделии и посвящается данная работа. Процедура получения эффекта требует разработки гидротермической математической модели теплопереноса, программирования ее в технологиях MathCAD, проведения и сопоставления результатов численного и натурного экспериментов, а также выход на

инженерную методику расчета устройств пульсирующего горения.

Описание объекта исследования. Для моделирования выбран теплогенератор водогрейного типа, камера сгорания и поверхности нагрева которого совмещены и представляют собой теплообменник типа труба в трубе. Геометрические характеристики теплообменника подобраны таким образом, что они определяют резонирующую частоту пульсаций в зоне горения и конвективно-радиационную поверхность теплообмена. Геометрия выполнена на основе идеи резонатора, созданного Гельмгольцем. Полученные, таким образом, искусственные пульсации накладываются на пульсации турбулентного потока. Горение организуется последовательностью серии микровзрывов, энергия которых используется для совершения работы всасывания компонентов горючей смеси, а также проталкивания образуемых продуктов сгорания в окру-

жающую среду. В условиях образования микровзрывов лежит подбираемый гармонический нестационарный процесс теплообмена со своей амплитудой и периодом.

Объектом исследования выбран котел пульсирующего горения типа резонатора Гельмгольца марки ПВ-400 (г. Королев), технические характеристики которого приведены в табл. 1. Модель котла приведена на рис. 1.

Таблица 1
Технические характеристики котла [1]

Наименование показателя	Ед. изм.	Значение
Номинальная теплопроизводительность	кВт	400
Диапазон регулирования мощности	%	0–100
Расчётный температурный перепад воды	°С	95–70
Температура уходящих газов	°С	130
Габаритные размеры котла	мм	2600×920×920
КПД котла	%	94

Обзор истории развития пульсирующего горения и современные направления науки и техники в области применения термоакустических колебаний приведен в авторских работах [1–5]. Процесс пульсирующего горения происходит следующим образом. При первичном поступлении топливной смеси в камеру сгорания осуществляется ее поджог. После полного сгорания смеси возникает ударная волна и снижение давления за ударной волной с одновременным охлаждением дымовых газов за счет теплопередачи в стенку камеры. При этом происходит поступление новой порции газозоудшной смеси за счет разрежения. Эта смесь нагревается до температуры самовозгорания (около 600°С) остаточным теплом дымовых газов. В процессе сгорания смеси дымовые газы из камеры сгорания под действием проталкивающей силы ударной волны направляются к открытому выходу через резонаторную горловину. Процесс повторяется без поджигания смеси посторонним источником. Система входит в автоколебательный режим. Устанавливается периодический процесс, именуемый пульсирующим горением [6].

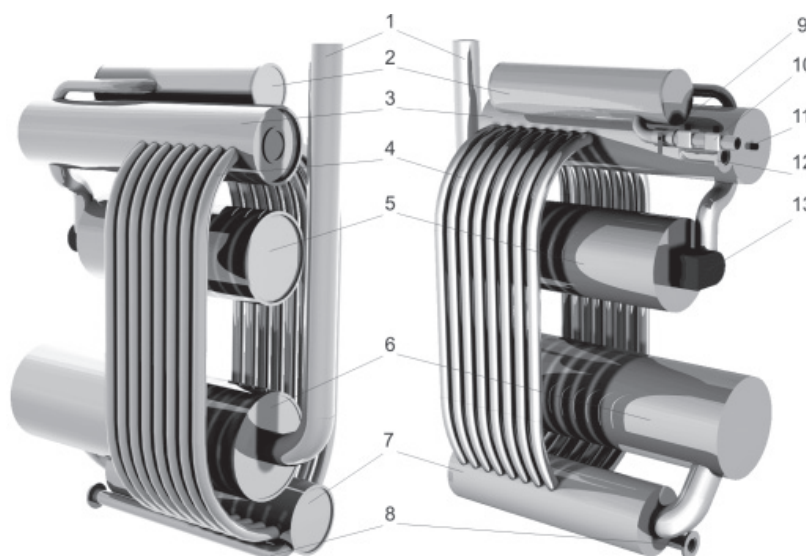


Рис. 1. Схема устройства котла ПВ-400 [7]:

- 1 – дымовая труба; 2 – газовый ресивер; 3 – камера сгорания; 4 – резонансные трубы; 5 – воздушный ресивер; 6 – глушитель выхлопа; 7 – резонансный ресивер; 8 – патрубок для подачи воды; 9 – кран для отключения газовой линии; 10 – электромагнитный запорный клапан; 11 – свеча зажигания; 12 – патрубок для отвода воды; 13 – дутьевой вентилятор

Частота этого процесса определяется конструкцией резонаторной системы, имеющей собственную резонансную частоту. Камера сгорания, резонансные трубы и ресивер окружены водяной рубашкой, по которой движется (противотоком к дымовым газам) нагреваемая вода [8].

Цель и задачи работы. В целом, для теплообменных конвективных поверхностей нагрева пульсационная составляющая усредняется, и циклическую гармонику микровзрывов можно считать установившейся. Тогда нестационарную задачу гидротермического теплопереноса можно

свести к стационарной задаче и гармонической, определяющей начальные и граничные условия протекания процессов.

Целью работы является исследование параметров работы котлов пульсирующего горения на примере теплогенератора с резонатором Гельмгольца, что позволит определить его рабочие характеристики, зависимости параметров, сформированные на базе законов, описывающих тепломассоперенос.

Для этого поставлены задачи по исследованию процесса периодического изменения давления в единичном объеме камеры, построению индикаторной диаграммы динамики изменения давления во времени, а также сравнение результатов с работами других авторов.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования являются гидротермические процессы, происходящие в промышленной водогрейной теплоэнергетической установке, работающей по принципу организации вибрационного пульсирующего горения и вынужденного конвективно-радиационного теплообмена между газообразным и водным теплоносителями с помощью поверхностей нагрева типа резонатора Гельмгольца.

Для решения поставленных задач применены методы аналитического, численного и натурного моделирования, основанные на применении системного анализа, теории подобия, аналогичности и эквивалентности получаемых результатов.

Математическая модель. Путем обработки данных устройства аналого-цифрового преобразования можно получить частотно-импульсный характер распространения термоакустических колебаний в координатах Р- τ .

Например, известна формула [9] для передаточной функции, представляющей собой соотношения колебаний давления на входе и выходе из канала. Это комплексная функция, которая зависит от фазовой скорости ω распространения волн давления и коэффициента затухания k .

$$p(x, \tau) = -c_z \rho \Delta P_v \cos\left(\omega\tau + \frac{\pi}{2}\right) e^{\omega k x}. \quad (1)$$

Здесь для характеристики волнового периодического процесса введена общая тригонометрическая гармоническая функция, где ΔP_v – изменения давления в процессе термоакустических колебаний среды. Для определения величины изменения давления в процессе термоакустических колебаний среды (в результате вибрационного горения) можно использовать ряд следующих уравнений (2)–(5), где c_z – скорость звука в рассматриваемой среде; ρ – плотность среды.

Скорость звука в исследуемой среде (в м/с) определяется по уравнению (2):

$$c_z = \sqrt{\frac{\gamma \cdot R \cdot T_g}{M}}, \quad (2)$$

где γ – показатель адиабаты среды; R – универсальная газовая постоянная; T_g – температура среды; M – молярная масса среды.

Повышение давления от звуковой волны (в Па) может быть определено на основании уравнения (3):

$$\Delta P_z = 9800(\rho \cdot c_z \cdot \tau_g), \quad (3)$$

где τ_g – время цикла.

Скорость движения среды в звуковой волне (в м/с) определяется следующим образом:

$$v = \frac{\Delta P_z}{\rho \cdot c_z}. \quad (4)$$

Повышение давления среды (в Па) может быть рассчитано по уравнению (5):

$$\Delta P_v = 9800(\rho \cdot v \cdot \tau_g). \quad (5)$$

Характер распределения скорости движения среды (в м/с) может быть определен из следующего соотношения (6):

$$v(x, \tau) = v \sin(\omega\tau) e^{\omega k x}. \quad (6)$$

Результаты исследования и их обсуждение

Исследования частотно-импульсного характера распространения термоакустических колебаний в действующем котле пульсирующего горения типа ПВ на основе резонатора Гельмгольца проведены при следующих условиях:

1. Давление в газовом патрубке – 102 кПа.
2. Давление в воздушном патрубке – 100 кПа (атмосферное давление).
3. Расход топлива – 36 м³/ч.
4. Температура воды на входе в котел – 44 °С.
5. Температура воды на выходе из котла – 50 °С.
6. Коэффициент избытка воздуха – 1,25.
7. Частота резонансная – 33 Гц.
8. Показатель адиабаты дымового газа γ – 1,4.

В рабочем режиме функционирования установки сделаны натурные испытания по аналогии с исследованиями в работе [10] для камеры Гельмгольца с аэродинамическим клапаном. Измерение динамики изменения давления там проводилось с помощью пьезоэлектрических преобразователей давления, устанавливаемых на стенке камеры сгорания опытной установки PCS (Pulsating Combustion System).

Было произведено считывание звукового сигнала, получение полной информации о нем и построение исходного графика сигнала Математическая обработка звукового файла производилась с помощью программы MathCAD 11 Enterprise Edition и дополнительным пакетом Signal Processing. Для перехода из размерностей напряжения в размерности давления проведено тарирование сигнала с помощью импульсной трубки, обратного клапана и U-образного

манометра. На рис. 2 представлены результаты экспериментального исследования волнового процесса и моделирования

с применением уравнений (1)–(5); на рис. 3 построена индикаторная частотно-импульсная диаграмма.

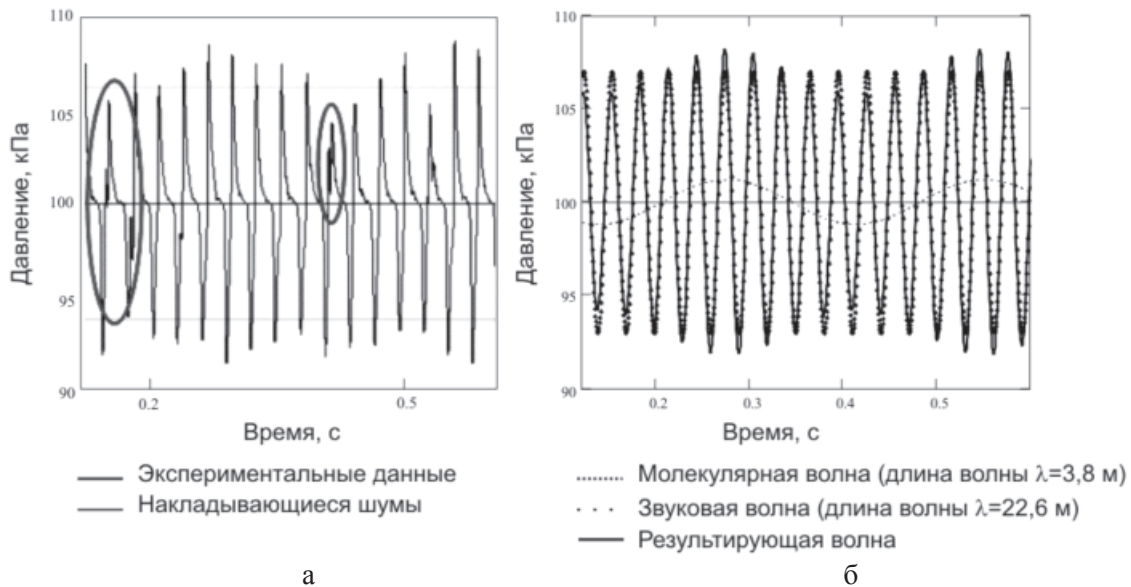


Рис. 2. Результаты расчетно-экспериментального моделирования волновых параметров газовой среды

Результаты эксперимента обработаны с помощью прямого преобразования Фурье. При этом определены параметры ряда – амплитуды и фазы гармоник. Получена функция, определяющая характер волнового распространения газовой среды

во времени $P-\tau$ для устройства пульсирующего горения.

Процесс изменения давления в тракте котла можно представить виде диаграммы с описанием происходящих при этом процессов (рис. 3).

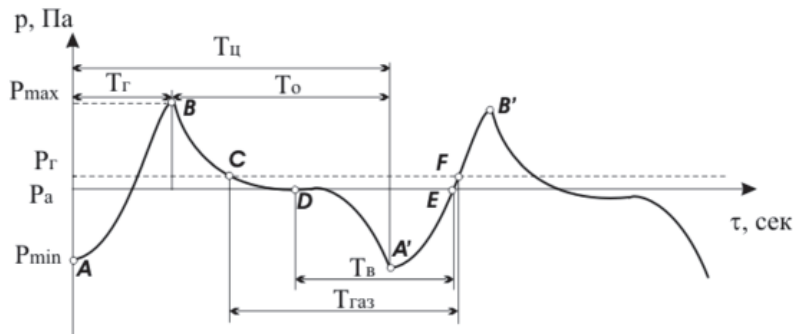


Рис. 3. Индикаторная диаграмма периодического изменения давления в единичном объеме камеры: $A-B$ – увеличение давления в процессе сгорания топливно-воздушной смеси; $B-A'$ – процесс охлаждения дымовых газов; $C-F$ – процесс поступления природного газа через газо-пульсирующий клапан; $D-E$ – процесс поступления воздуха через воздушно-пульсирующий клапан; $A-A'$ – время 1 цикла (определяется акустическими свойствами резонатора)

Таким образом, экспериментально-расчетным путем получено решение гармонического уравнения, описывающего распределения давления по времени. Функциональная зависимость обработана с помощью ряда Фурье, для которого экспериментально получены коэффициенты ряда. Определены граничные условия для стаци-

онарной задачи термогидродинамического моделирования процессов в КПП по осредненным величинам

Для функциональной зависимости $P(\tau)$ давления по времени на отрезке $(0, T)$ осуществлен с помощью прямого преобразования Фурье. При этом определены параметры ряда – амплитуды и фазы гармоник.

Для сравнения данные по амплитуде давления соотнесены с результатами аналогичных экспериментов корейских исследователей [10] для камеры Гельмгольца с аэродинамическим клапаном – PCS (Pulsating Combustion System). Результаты двух экспериментов сведены в табл. 2.

Таблица 2
Результаты измерения амплитуд давления в камере сгорания [4]

Величина	PCS	ПВ-400
Максимальная амплитуда, кПа	113,8	111,1
Минимальная амплитуда, кПа	93,1	91,5

В виду того, что исследования проводились на двух устройствах 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.

Выводы

Авторами статьи сделаны попытки получить зависимость изменения давления во времени для энергетического устройства типа камеры Гельмгольца. Процесс периодического изменения давления в единичном объеме камеры в виде индикаторной диаграммы разложен на основные составляющие, визуально показано время срабатывания газовых и воздушных клапанов.

Достоверность основных научных положений, выводов и рекомендаций, отраженных в работе, обеспечивается результатами проведения эксперимента на промышленной установке, а также результатами сравнения с известными экспериментальными данными исследователей подобных процессов в теплогенерирующих аппаратах.

Исследования проведены при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках Государственного задания высшим учебным заведениям на 2012 год 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.: Изд-во «Машиностроение», 2006. – № 12 (117). – С. 53–57.
2. Сеницын А.А. Исследование вибрационных характеристик работы котельных агрегатов // 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 // Новости теплоснабжения. – М.: ООО Изд-во «Новости теплоснабжения», 2010. – № 3 (115). – С. 24–27.
4. Сеницын А.А. Исследование особенностей работы котла, основанного на пульсирующем горении газообразного топлива // Нефтегазовое дело. – Уфа: УГНТУ, – 2006. Издатель: Уфимский государственный нефтяной технический университет. – Сетевой адрес: <http://www.ogbus.ru>
5. Сеницын А.А. Моделирование процессов в теплогенераторе на основе пульсирующего горения // Исследовано в России. – М.: МФТИ, 2006. Издатель: Московский Физико-Технический Институт. – Сетевой адрес: <http://zhurnal.apc.relam.ru> № 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. Особенности расчета энергетической установки импульсно-детонационного сжигания органического топлива / А.А. Сеницын, П.О. Тимошенко // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион: Научно-образовательный и прикладной журнал. – 2012. – № 3 (166). С. 22–27.
8. Сеницын А.А. Пульсирующее горение // Энергия: экономика, техника, экология. – М: Наука, 2007. – № 1. – 80 с.
9. Теория топочных процессов / Г.Ф. Кнорре, К.М. Арефьев, А.Г. Блох. – М.: Энергия, 1966. – 491 с.: ил.
10. Keel, S.I. A Study of the Operating Characteristics of a Helmholtz-type Pulsating Combustor / S.I. Keel, Hyun Dong Shin // Institute of Energy. – 1991. – Vol. 64, 99.