

УДК 534.142

ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ ОПЫТНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕОРИИ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, СОПРОВОЖДАЮЩИХСЯ ТЕРМОАКУСТИЧЕСКИМИ КОЛЕБАНИЯМИ В УСЛОВИЯХ ИМПУЛЬСНО-ДЕТОНАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ ТОПЛИВА

Синицын А.А., Тимошенко П.О., Никифоров О.Ю.

Вологодский государственный технический университет, Вологда, e-mail: 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 использованием метода системного подхода разработана методика расчета устройства и рассчитаны значения некоторых параметров работы экспериментальной установки, характеризующие процесс вибрационного горения топлива. Определены геометрические размеры устройства и режимы его работы. Указаны основные направления дальнейших исследований, которые позволят разработать теорию физических процессов, сопровождающихся термоакустическими колебаниями в условиях импульсно-детонационного горения топлива.

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

FEATURES OF CREATING OF EXPERIMENTAL UNIT FOR THE FORMATION OF THE THEORY OF PHYSICAL PROCESSES ACCOMPANYING THERMOACOUSTIC OSCILLATION IN A PULSED DENATATION COMBUSTION

Sinitsyn A.A., Timoshenko P.O., Nikiforov O.Y.

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

Actuality of the research is determined, the main problems of forming methods of calculating of energy devices operating on the basis of vibrational fuel combustion are revealed. The choice of the optimal research direction is determined. The method of the device calculating is created and values of some parameters of the experimental unit characterizing the process of vibrational fuel combustion are calculated with help of a system approach. The geometrical dimensions of the device and its mode of operation are determined. The basic directions of further research are pointed out, this research will help to create a theory of physical processes involving thermal acoustic oscillations in a pulse detonation fuel combustion.

Keywords: pulse detonation combustion, Helmholtz resonator, fossil fuels

Актуальность проблемы повышения эффективности работы источников теплоты является бесспорным аргументом при разработке новых теплогенерирующих устройств и модернизации существующих. Традиционные методы, как повышение мощности горелочного устройства, применение топлива с повышенным тепловыделением при сгорании, увеличение поверхности теплопередачи и т.д. не всегда выполнимы и зачастую являются высокозатратными. Простой механический перенос наработанного опыта проектирования, строительства и эксплуатации объектов газопотребления абсолютно неприемлем в современных условиях. 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. Такой режим горения позволяет обеспечить максимальную полноту тепловыделения топлива, существенно интенсифицировать тепломассообменные процессы и повысить теплонапряженность камеры сгорания. При таких условиях очевидно

уменьшение металлоемкости конструкции, сокращение затрат на монтаж и обслуживание теплоэнергетических установок. Кроме того, продукты сгорания отвечают самым жестким экологическим требованиям.

В настоящее время во многих странах ведутся интенсивные исследования в области проектирования и внедрения в технологические процессы теплоэнергетических установок на основе пульсирующего горения. Отсутствие горелки как таковой и значительное давление дымовых газов на выходе, не требующее высокой дымовой трубы, сохранение работоспособности даже при избыточном давлении, близком к нулю, в питающем газопроводе являются дополнительными преимуществами котла пульсирующего горения, обеспечивающими его привлекательность в теплоэнергетическом секторе рынка. 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.

Общие сведения о процессе пульсирующего горения. Пульсирующим горением

называют неустойчивый режим горения с изменяющимися во времени динамическими характеристиками процесса, имеющими периодическую составляющую.

Теоретически возможность осуществления пульсирующего горения была обоснована Ч. Стреттом (лордом Рэлеем) в конце XIX века в Англии. Были разработаны устройства вибрационного горения полезного назначения с основными направлениями на решение ряда задач промышленной теплоэнергетики, а также в создании двигателей летательных аппаратов.

Вопрос пульсирующего горения тесно связан с исследованием в области газовой детонации. Ее использование обосновано стремлением наиболее эффективно преобразовать химическую энергию топлива в кинетическую энергию. Детонационный режим горения позволяет проектировать двигатели с высокой удельной мощностью. При детонационном сжигании кислородо-водородной газовой смеси удельная мощность энерговыделения может на порядок превосходить удельную мощность ракетных кислородоводородных двигателей. Параметры газа при детонационном сжигании во много раз больше, чем при обычном сжигании. Наиболее полный обзор по детонации газа приведен в работе Т.Е. Баженова. Исследования данного явления проведены в зарубежных работах: Е. Wintenberger, М. Cooper, J.E. Shepherd.

Наряду с проведением теоретических расчетов, посвященных методам сжигания топлива, осуществлено довольно много экспериментов на установках с подобными процессами. Особый интерес представляют исследования термоакустических колебаний в различных установках. Это поющее пламя Хиггинса, резонатор Гельмгольца, установка Зондхаусса, трубы Рийке, Шмидта и Марконе. Процессы такого типа горения моделировались на топочных устройствах различных конфигураций для различных видов топлива (на твердом, жидком и газообразном) В.С. Северяниным, Б.Д. Кацнельсоном, S.I. Keel, A.B. Потапкиным и др.

Попытки построения теории огневого моделирования предпринимались еще более полувека назад. Многими авторами была сделана общая постановка задачи моделирования факельного горения, распространения пламени в трубе, детонационного горения, создания этих моделей и опытное подтверждение их действительности.

Наиболее интересными в этом плане являются работы Д.А. Франк-Каменского, Н.Н. Семенова. Исследование пламени и взрывов газа в трубах приведено в работе С. Джексона. Автором даются основные по-

нятия теории турбулентного потока, модель фронта пламени в турбулентном потоке согласно теории Дамкелера. На основе опытов Никурадзе для пламени в потоке с трубной турбулентностью эта модель была записана через турбулентную скорость горения.

Исходя из всего вышеперечисленного, можно сказать, что вибрационное горение представляет собой совокупность акустических, газодинамических, диффузионно-тепловых, химико-кинетических и других физических процессов. При этом в изучении механизма этого сложного явления принципиальное значение имеет теория.

Существует большое количество устройств пульсирующего горения или аппаратов пульсирующего горения с различным видом организации автоколебательной системы и различного назначения – от котлов до печей-утилизаторов и сушильных установок [2–3].

Наряду с достоинствами устройств пульсирующего горения, связанными с повышением теплонапряженности, возникают и недостатки, заключающиеся в прогорании поверхностей нагрева, а также значительный шум, обусловленный процессом пульсирующего горения. Все это приводит к тому, что при необходимости установки нового теплогенерирующего оборудования подобные устройства отодвигаются на второй план, и выбор делается не в их пользу. Поэтому основной задачей при проектировании, а также при вечерочном расчете подобных агрегатов является определение термогидродинамических параметров рабочего процесса, что, в свою очередь, может быть экспериментально получено на опытной установке.

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 структурного решения по созданию энергоэффективной системы импульсно-детонационного сжигания топлива, организуемого в жаротрубном водогрейном котле типа камеры Гельмгольца.

Для этого требуется выполнить следующее:

- создать универсальную экспериментальную установку для изучения процессов, сопровождающих вибрационное горение;
- провести расчетно-экспериментальное исследование рабочего процесса горения в огнетехническом устройстве типа резонатора Гельмгольца;
- выполнить математическое моделирование нестационарных газодинамических процессов в котле с учетом воздействия на них периодического выделения тепла в зоне горения;

– разработать теорию рабочего процесса в аппаратах пульсирующего горения с учетом обратной связи между акустическими и тепловыми возмущениями, обеспечивающей поддержание автоколебательно-го режима работы котла;

– создать на ее основе методику расчета конструктивных параметров для проектирования экономичных и высокоэффективных теплоэнергетических установок широкого спектра применения.

Поставленная задача является продолжением НИОКР, проводимой ФГБОУ ВПО «Вологодский государственный технический университет» в рамках гранта имени выдающихся организаторов нефтяной и газовой промышленности (Байбакова Н.К., Динкова В.А., Кортунова А.К., Мальцева Н.А., Муравленко В.И., Оруджева С.А., Филановского В.Ю., Шашина В.Д., Щербины Б.Е.) Международной Топливно-Энергетической Ассоциации по теме «Исследование энергетической и экологической эффективности системы пульсирующего сжигания природного газа». К настоящему времени проведены исследования в области оценки эффективности применения котлов пульсирующего горения на базе действующего котла ПВ-400 («Интеко»). Полученные результаты показали перспективность выбранного направления, однако для разработки методики расчета аппаратов пульсирующего горения требуется создание экспериментальной установки, позволяющей моделировать огнетехнические и аэродинамические процессы для различных условий эксплуатации и различного конструктивного исполнения.

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 методики расчета геометрических размеров устройства. Расчёт геометрических размеров экспериментальной установки пульсирующего горения с механическими пульсирующими клапанами проводился на основании известных уравнений для определения мощности энергетической установки, работающей на газообразном топливе по принципу резонатора Гельмгольца (см. [2]). В качестве исходных данных принимались частота, давление газа на входе, характеристики газовой смеси, соотношение газ-воздух, на основе чего определялся часовой расход газа и воздуха, а также остальные параметры по принципу расчета горелочного теплогенератора.

На основании указанных характеристик определялись параметры, характеризующие

процесс пульсирующего горения, такие как скорость звуковой волны в резонаторном контуре, объём дымовых газов при температуре горения воздушно-газовой смеси, молекулярная скорость движения продуктов горения, величины изменения давления в камере сгорания в течение полного цикла, а также характерные размеры основных элементов конструкции аппарата: камеры сгорания, резонаторной и газовыводящей его частей.

В таком устройстве роль инерционного звена играет масса газа в резонансной трубе, а емкостного – присоединенный к ней объём. В трубе, открытой на концах при повышении давления сжатый газ будет стремиться расширяться и под действием возникшего перепада давлений потечет к открытому концу. Со временем вся потенциальная энергия сжатого газа перейдет в кинетическую энергию истечения, после чего процесс будет продолжаться по инерции, пока в трубе не возникнет разрежение. Далее явление будет проходить в обратном порядке. Газ начнет двигаться назад, и там опять давление станет выше атмосферного. Так установится колебательный процесс с возникновением пучностей и узлов – стоячая волна.

За счет воспламенения газозвуковой смеси колебательный процесс получает новый импульс, который является источником энергии для проталкивания продуктов сгорания и для поступления новой порции газозвуковой смеси. Процесс возобновляется до прекращения подачи газа в камеру сгорания. Таким образом, система «пульсирующие клапаны – камера сгорания» выполняет роль некоего нагнетателя для подачи газа и воздуха в устройство.

Отметим, что автоколебательная система включает собственно колебательную систему, источник энергии и механизм обратной связи, управляющий источником. При возбуждении вибрационного горения колебательной системой является камера сгорания, к которой в более сложных случаях могут добавиться другие элементы установки.

Ввиду того, что на выходе из колебательного контура температура продуктов сгорания завышена, то необходимо ее снизить до оптимальной величины, поэтому следом за резонансными трубами устанавливается ещё одна колебательная система, имеющая геометрические размеры, позволяющие максимально передать теплоту газа теплоносителю и не нарушить пульсирующий процесс горения в камере. Это возможно в том случае, если геометрия дополнительных поверхностей теплоотвода будет иметь близкие частотные характеристики с основной частью котла и не создаст сильного противофазного сопротивления. Расчет

второй колебательной системы ведется по тем же формулам и имеет аналогичную последовательность вычислений. Этот контур включает в себя коллектор, а дымовая труба играет роль резонансной трубы. Таким образом, создаётся аналогичный колебательный контур со своими параметрами.

В табл. 1 приведены основные геометрические характеристики устройства, определенные по описанной выше методике.

Таблица 1

№ п/п	Характеристика	Значение, м
<i>Камера сгорания</i>		
1	Диаметр	0,09
2	Длина	0,73
<i>Резонаторная труба</i>		
3	Диаметр	0,04
4	Длина	1,37
<i>Коллектор</i>		
5	Диаметр	0,09
6	Длина	0,74
<i>Газовыводящая труба</i>		
7	Диаметр	0,05
8	Длина	0,79
<i>Топливо-воздушная система</i>		
9	Диаметр калибра по газу	0,01
10	Диаметр калибра по воздуху	0,05

Описание экспериментальной установки. Прототипом проектируемой установки стал котел пульсирующего горения типа резонатора Гельмгольца. Характерной особенностью подобного аппарата является способность совершать низкочастотные собственные колебания, длина которых значительно больше размеров резонатора.

Процесс пульсирующего горения организован 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 через стенку камеры. При этом происходит поступление новой порции газозвушной смеси за счет возникновения разрежения в камере. 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 дополнительным источником. Система входит в автоколебательный режим. Устанавливается периодический процесс, именуемый пульсирующим горением. Более подробно процесс изложен в работах [4–6].

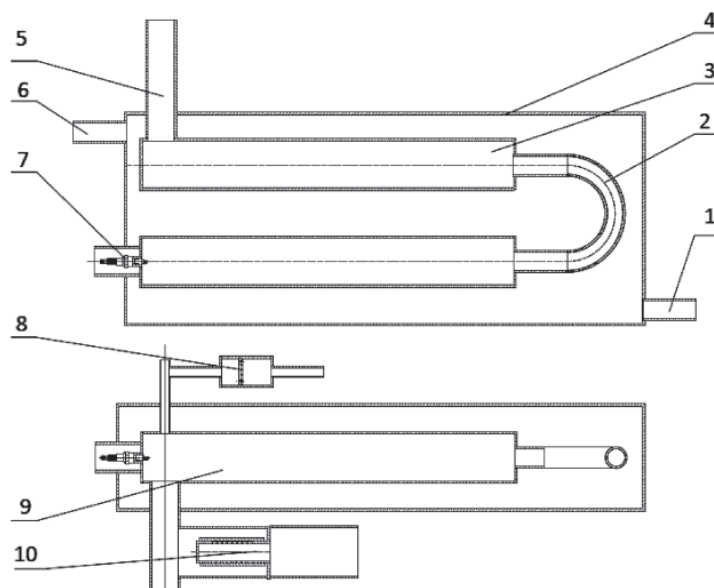


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 – вход воды; 2 – резонаторная труба; 3 – коллектор; 4 – водяная рубашка; 5 – выхлопная труба (дымовая); 6 – выход воды; 7 – запальная свеча; 8 – газопульсирующий клапан (вход газа); 9 – камера сгорания; 10 – воздушнопульсирующий клапан (вход воздуха)

Особенностью установки является то, что частота описанного выше процесса определяется конструкцией резонаторной системы, имеющей собственную резонанс-

ную частоту. Камера сгорания и резонансные трубы окружены водяной рубашкой, по которой движется (противотоком к дымовым газам) нагреваемая вода (рис. 2).

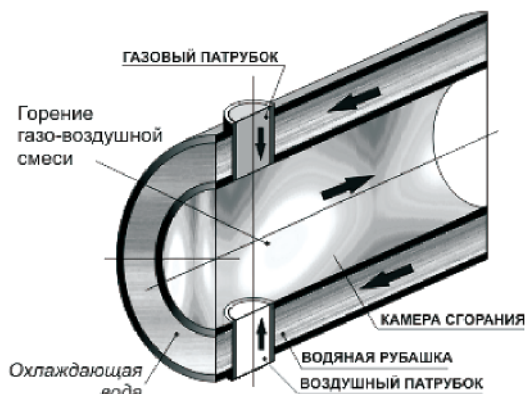


Рис. 2. Схема организации теплообмена типа «труба в трубе» в разрезе

В рассматриваемом аппарате на режим турбулентного движения накладывается пульсационная составляющая, которая повышает эффективность теплопередачи, снижает площадь теплообмена и, тем самым, определяет малые габаритные размеры агрегата с повышенной теплонапряженностью при тех же мощностях, что и у факельных теплогенераторов [7].

Для определения термоакустических параметров рабочего процесса пульсирующего горения топливно-воздушной смеси установка оснащена контрольно-измерительными приборами, осуществляющими в режиме реального времени отслеживать и фиксировать динамику изменения температуры, давления, скорости движения газовой среды, а также характер теплоотдачи от дымовых газов к охлаждающей воде. В табл. 2 приведены основные технические характеристики установки.

Таблица 2
Основные технических характеристики проектируемой установки

№ п/п	Характеристика, ед. изм.	Значение
1	Мощность установки, кВт	50
2	Расход воздуха, м ³ /ч	5,4
3	Расход топлива, м ³ /ч	2,9
4	Частота колебаний, Гц	50
5	Температура в камере сгорания, °С	600
6	Температура нагрева воды, °С	40...60
7	Геометрические размеры, мм	1200×700×400

Выводы

Разработанная установка для исследования процессов импульсно-детонационного сжигания органического топлива позволит в дальнейшем:

- провести экспериментальные исследования особенностей автоколебательного режима, тепломассопереноса в камере сгорания котла, а также сложного теплообмена в комбинированной технической системе;

- исследовать прототип новой огнетехнической автоколебательной системы, построенной на основе предложенных моделей и методов;

- разработать методологию расчета энергоэффективных устройств пульсирующего сжигания топлива и выработки тепловой энергии;

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

- сопоставить и обобщить результаты анализа научно-информационных источников, теоретических и экспериментальных исследований;

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

- разработать рекомендации по использованию результатов проведенных НИР на производстве и создании научно-образовательных курсов.

Результатом станет составление прогноза развития направления энергетики на базе импульсно-детонационного горения на основе аналитических материалов и полученных результатов теоретических и экспериментальных исследований. Работа проводится при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований по гранту №11-08-00226-а.

Список литературы

1. Синицын 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>.
2. Синицын А.А. Исследование термогидродинамических характеристик котла пульсирующего горения типа резонатора Гельмгольца // Наука и образование. Инженерное образование. – М.: МГТУ, – 2006. Издатель: Московский государственный технический университет им. Баумана. Сетевой адрес: <http://technomag.edu.ru>. N гос. регистрации 0420900025.
3. Синицын 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.relarn.ru> N гос. регистрации 042030001.
4. Синицын А.А. Влияние вибрационных характеристик на работу котла пульсирующего горения / А.А. Синицын, В.И. Игонин // Научно-технический справочник. Инженерный журнал. – М.: Машиностроение, 2006. – №12 (117). – 64 с.
5. Синицын А.А. Пульсирующее горение // Энергия: экономика, техника, экология. – М.: Наука, 2007. – № 1. – 80 с.
6. Синицын 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.
7. Синицын А.А. Исследование особенностей работы котла пульсирующего горения / А.А. Синицын, В.И. Игонин // Новости теплоснабжения. – М.: ООО Изд-во «Новости теплоснабжения», 2010. – № 3 (115). – С. 24–27.

Рецензенты:

Горбунов В.А., д.ф.-м.н., профессор, главный специалист ООО НПФ «ЭнергоКИТ», г. Вологда;

Калягин Ю.А., д.т.н., профессор, главный конструктор ООО Научно-производственный центр «Информационные и энергетические технологии», г. Вологда.

Работа поступила в редакцию 09.12.2011.