

КОТЛЫ С ПУЛЬСИРУЮЩИМ ГОРЕНИЕМ

Докт. техн. наук, проф. СЕВЕРЯНИН В. С.

Брестский государственный технический университет

Котлы (водогрейные, парогенераторы) — устройства, преобразующие химическую энергию топлива в тепловую энергию рабочего тела. Поэтому они имеют два основных элемента — топку и теплообменник. Качества этих элементов (основные теплотехнические показатели, габариты, стоимость, воздействие на окружающую среду, надежность, управляемость, ремонтнопригодность, безопасность и т. д.) обуславливают эффективность агрегата в целом, и с учетом субъективных факторов (общая техническая политика, подготовленность администрации и персонала, реклама, степень промышленной разработанности и т. п.) позволяют новым разработчикам занять свое конкурентоспособное место в плотно освоенной нише теплотехнического оборудования.

Для Республики Беларусь в свете проблем энергосбережения создание нового котельного оборудования является важной проблемой. Поэтому в рамках межвузовской программы фундаментальных исследований «Приоритет» (научный руководитель — чл.-кор. НАН РБ Стрелюк М. И.) была в 1998–2000 гг. проведена научно-исследовательская работа «Разработать теоретические основы высокоэффективного использования топлива в котлах» (№ гос. рег. 19974384). НИР закончена конкретными конструкторскими предложениями.

Пульсирующему горению, как известно, присущ ряд свойств:

интенсификация горения. В диффузионной области реагирования, основной для топочной техники, скорость горения, т. е. теплонапряженность процесса, зависит от условий смесеобразования, обдувания частицы топлива. В пульсирующем потоке скорость обдувания, турбулизация несравненно выше, чем в стационарном;

интенсификация конвективного теплообмена. Это наиболее изученное свойство пульсирующих газовых потоков. Применительно к котлам особо следует подчеркнуть, что наибольшая интенсификация (в несколько раз) наблюдается для малых чисел Рейнольдса, характерных для плотных пучков компактных теплообменников;

самонаддув. Устройство пульсирующего горения является как бы газовым насосом, что позволяет ему работать в режиме самостоятельного обеспечения воздухом как для горения, так и для удаления продуктов сгорания и даже прокачки их через какую-либо аэродинамическую нагрузку. Если же в устройстве имеется дутьевой вентилятор, то расход энергии на него снижается;

очищающее действие пульсаций на поверхности нагрева. Пульсирующий газовый поток воздействует на внешнюю поверхность теплообменных элементов двумя способами: как обычная струя с переменной скоростью и как акустическая волна. Известен метод очистки энергетических котлов, котлов-утилизаторов на базе этого явления;

уменьшение вредных выбросов. Нормальная работа устройства пульсирующего горения не допускает не только выделения недожогов, но характеризуется на порядок меньшими выбросами оксидов азота;

снижение температуры факела. Так как часть энергии топлива идет на создание колебаний газового потока, энтальпия и, следовательно,

температура продуктов сгорания несколько снижается (порядка 5...10 %). Это облегчает работу материала топочной камеры;

уменьшение эксергетических потерь. По сравнению с обычными способами сжигания топлив, когда эксергетический КПД топки практически равен нулю, пульсирующее горение позволяет реализовать прямую механическую работу без конструкционных затрат. Эксергия реализуется, например, в ПуВРД, в бескомпрессионных ГТУ и т. д. Для котлов — это режим самонадува;

теплофикационный эффект. Общий смысл теплофикации — передача теплоты потребителю от рабочего тела, которое предварительно произвело механическую работу. Расчеты показывают, что благодаря этому эффекту режим самонадува позволяет экономить примерно 10 % топлива по сравнению с наддувом вентилятором с электроприводом;

стабилизирующее действие теплосъема на режим пульсаций. Оказывается, если максимум теплоотвода от газа к стенке при пульсациях скорости попадает в фазу разрежения, то автоколебания усиливаются. Эти условия реализуются в описанных далее устройствах. Практическое достоинство этого свойства — сочетание высокофорсированного горения и утилизации теплоты в одном агрегате;

распыление жидкостей. Пульсации газового потока деформируют и разрушают струи и капли жидкости, объемы и потоки других газов. Это свойство улучшает смесеобразование, смягчает требования к форсункам и горелкам, насосам и фильтрам;

шумогасящее действие теплотехнических объектов. Достоинства пульсирующего горения реализуется благодаря пульсациям давления, а это — источник мощного акустического излучения (в самом устройстве 100...120 дБА). Поверхность нагрева, размещенная в устройстве или сразу за ним, служит средством защиты от акустического загрязнения окружающей среды. Поэтому утилизация теплоты и кинетической энергии газа в этом объекте совмещает шумоглушение с решением основной теплоэнергетической задачи. По патентной литературе известно много схем маломощных водо- и воздухонагревателей с пульсирующим горением, но энергетические котлы с этим новым способом сжигания топлив практически не известны.

На основе принципиальной схемы устройства пульсирующего горения камерного гармонического типа [1] в БГТУ разработаны и опробованы конструкции водотрубных и жаротрубных котлов нового типа.

На рис. 1 представлен модульный водотрубный водогрейный или прямоточный паровой котел. В газоплотном корпусе 1 расположено несколько модулей 2 (в данном случае — 9 шт.). На корпусе смонтированы: вентилятор 3, дымовая труба 4, глушитель 5. Модуль 2 — это крупномасштабная камера пульсирующего горения, максимально заполненная поверхностями нагрева. Основные элементы модуля: камера воспламенения 6, цилиндрическая поверхность которой образована водяной рубашкой, резонансная труба 7, в которой расположены трубы 8 в виде петель, подсоединенных к водяной рубашке камеры воспламенения изнутри. Таких петель 32 шт., при этом трубы 8 образуют поверхность резонансной трубы, и все возвращаются в камеру воспламенения 6; петли снаружи скреплены кожухом, образующим цельную конструкцию модуля 2. На торцевой стенке камеры воспламенения смонтированы воздушные аэродинамические клапаны 9 трубчатого типа и форсун-

ка (горелка) 10. Модули по воде соединены параллельно, последовательно или по смешанной схеме.

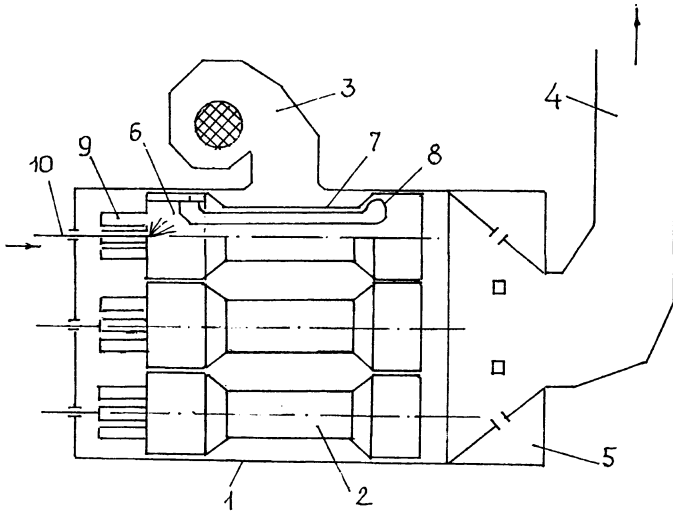


Рис. 1

На рис. 2 показан газотрубный котел. Его отличие от известных водонагревателей с пульсирующим горением состоит в применении устройства пульсирующего горения большой тепловой мощности, резонансная труба которого свернута в спираль, погруженную в водяной объем. В цилиндрическом заполненном водой корпусе 1 установлено устройство пульсирующего горения. В торце расположена камера воспламенения 2 конусной формы, от нее касательно отходит спиральная резонансная труба 3 квадратного поперечного сечения. Аэродинамический клапан 4 направлен в воздушную камеру, где установлена напорная воздушная труба 7, создающая разрежение за счет эжекции в дымовой трубе 6. Топливо (жидкое или газообразное) подается форсункой или горелкой 5.

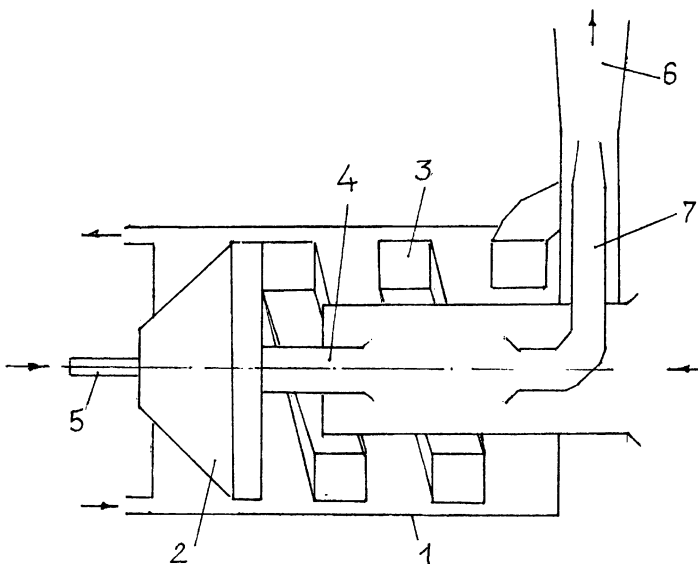


Рис. 2

На основе слоевого пульсирующего горения разработан также котел (рис. 3), состоящий из цилиндрического корпуса 1, внутри которого заключено семь жаровых труб 2, нижние концы которых выходят вниз относительно дна корпуса 1. В жаровых трубах 2 расположены пучки теплообменных труб, образующие конвективный теплообменник 3. На одной четверти жаровых труб 2 установлены горелки 4. Последние представляют собой короб с воздушными патрубками (в случае жидкого топлива на дно короба подается мазут, соляр и т. п., а для газового топлива в коробе организируются газовые сопла). Горелки свободно перемещаются для фиксации пульсационного режима горения. Они могут быть заменены во время работы котла. Над корпусом через корпусный переходник устанавливается дымовая труба, тяги которой достаточно для удаления продуктов сгорания.

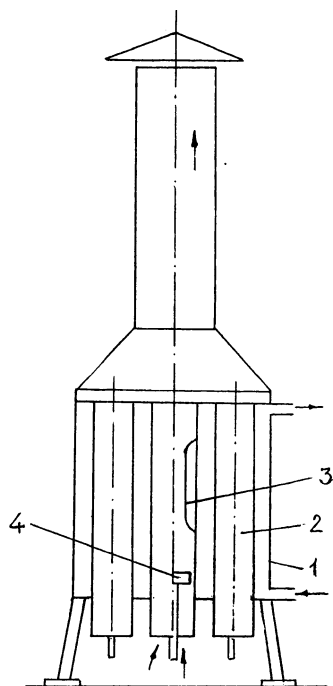


Рис. 3

При расчете котлов с пульсирующим горением определяются, задаются, принимаются следующие параметры:

δp — амплитуда давления газа при пульсациях, Па;

$\rho_{\text{в}}, \rho_{\text{г}}, \rho_{\text{ч}}$ — плотности воздуха, газа и частицы топлива, кг/м³;

B — расход топлива, кг/с;

$Q_{\text{н}}^{\text{р}}$ — его теплота сгорания, кДж/кг;

t — температуры, °С или К;

T — период пульсаций, с;

f — частота пульсаций, №/с;

λ — длина звуковой волны, м;

τ — время выгорания частицы топлива, с;

d — размер частицы топлива, м;

k — численный коэффициент;

$L_{\text{ак}}, L_{\text{рт}}$ — длина аэродинамического клапана и резонансной трубы, м;

$S_{\text{ак}}, S_{\text{рт}}$ — их поперечное сечение, м²;

$V_{\text{КПГ}}$ — объем камеры пульсирующего горения, м³;

$V_{\text{г}}^0, V_{\text{в}}^0$ — объем газа и воздуха на 1 кг топлива, м³/кг;

a — скорость звука в газе, м/с;

ν — коэффициент кинематической вязкости газа, м²/с;

$K_{\text{с}}$ — поверхностная скорость горения, кг/(м²·с);

$V_{\text{г}}$ — объем полости глушителя, м³;

$S_{\text{о}}$ — поверхность отверстий глушителя, м²;

l — эффективная длина этих отверстий, м.

Эти параметры связаны следующими зависимостями, известными и полученными в упомянутой работе при анализе устройств пульсирующего горения:

$$\left\{ \begin{array}{l} \delta p = \frac{Q_H^p B}{4V_{\text{КПГ}} f}; \\ \delta p = \frac{L_{\text{ак}} V_B^0 B}{L_{\text{пр}} S_{\text{ак}}}; \\ S_{\text{ак}} = B(V_{\text{г}}^0 - V_B^0) \frac{\rho_B}{\rho_{\text{г}}} \frac{L_{\text{пр}}}{L_{\text{ак}}} \frac{1}{10\sqrt{t}}; \\ f = \frac{20\sqrt{t}}{4L_{\text{пр}}}; \quad a = \lambda f = \frac{\lambda}{T}; \quad 4L_{\text{пр}} = \lambda; \\ \frac{4df\rho_{\text{г}} a}{\delta p} \leq \frac{1}{\sqrt{1+A^2}}; \\ A = k \frac{\rho_{\text{г}}}{\rho_{\text{ч}}} \frac{v}{fd^2}; \\ \tau \leq \frac{L_{\text{пр}} S_{\text{пр}}}{V_{\text{г}}^0 B t / 273}; \quad \tau = \frac{\rho_{\text{ч}}}{2} \int_0^d \frac{d(d)}{K_s}; \\ S_{\text{пр}} = \frac{\tau V_{\text{г}}^0 B}{L_{\text{пр}}}; \\ S_{\text{ак}} = \frac{2B\rho_B L_{\text{пр}}}{\rho_{\text{г}} L_{\text{ак}} 10\sqrt{t}}; \\ L_{\text{ак}} = \frac{2S_{\text{ак}} B \rho_B L_{\text{пр}}}{\rho_{\text{г}} 10\sqrt{t}}; \\ L_{\text{пр}} = \frac{\tau V_{\text{г}}^0 B}{S_{\text{пр}}}; \\ f = a \sqrt{\frac{S_0}{IV_{\text{г}}}}, \end{array} \right.$$

при коэффициенте избытка воздуха, близком к единице.

Следует также учитывать следующие эмпирические зависимости:

$$L_{\text{ак}} \approx 0,04 \lambda;$$

$$S_{\text{ак}} \approx 0,6 S_{\text{пр}};$$

$$L_{\text{пр}} / d_{\text{пр}} > 5.$$

При расходе топлива B на один модуль или камеру пульсирующего горения 10...50 кг/ч (тепловой мощности порядка 100...500 кВт) основные геометрические характеристики следующие: $L_{\text{пр}} = 1,8...3,5$ м; диаметр аэродинамических клапанов — 20...80 мм в зависимости от их количества; диаметр резонансной трубы — 50...300 мм; отношение суммы поперечного сечения тепловоспринимающих труб к сечению резонансной трубы (коэффициент загромождения) — до 0,3.

Модуль котла по рис. 1 был изготовлен и испытан на соляровом топливе и мазуте. При длине 3 м и диаметре 0,25 м резонансная труба вмещает 10 м² поверхности нагрева. Эквивалентный диаметр резонанс-

ной трубы равен 160 мм. Трубы теплообменника имеют диаметр 22 мм, количество петель 32 шт. Отработана технология изготовления модуля.

Основные показатели работы модуля:

расход топлива (соляр) – 20...50 кг/ч;

расход воды – до 4,4 т/ч;

нагрев воды – 60...80 °С;

КПД – 73...92 %;

температура уходящих газов – 60...130 °С;

средний коэффициент теплопередачи – 60...80 Вт/(м²·К);

тепловая мощность – 300...400 кВт.

Этот модуль был опробован на Минской ТЭЦ-1 при сжигании мазута. Расход воды составляет до 10 т/ч, температура воды на входе – 60...70 °С, на выходе – 100...120 °С, давление мазута – 1,6 МПа, его температура – 70...80 °С. Регулировка тепловой мощности осуществляется топливным вентилем.

По стационарным условиям было проведено только два опыта, которые показали, что организация сжигания мазута в условиях интенсивного отвода теплоты изнутри самого факела возможна. Такое сжигание можно сравнить с процессом в низкотемпературном кипящем слое, однако при пульсирующем горении требуются значительно меньшие конструктивные и энергетические затраты. Тепловая мощность котла по рис. 1 может составить 10...20 МВт, поэтому его целесообразно использовать не только как стационарный агрегат, габариты и металлоемкость которого на порядок ниже, чем для обычных котлов, но и транспортабельный для строительных, нефтедобывающих и других производств.

Котел, согласно рис. 2, был изготовлен и испытан на Минском заводе отопительного оборудования. Основные геометрические показатели: диаметр корпуса – 600 мм, длина корпуса – 780 мм, длина резонансной трубы – 3,8 м, ее поперечное сечение – 100 × 100 мм (квадратное). Диаметр аэродинамического клапана – 90 мм, его длина – 410 мм. Режимные характеристики: расход воды – 6 т/ч, температура холодной воды – 9 °С; горячей – 32 °С; расход топлива – 15 кг/ч (соляр), КПД по балансу – 90 %; тепловая мощность – 170 кВт. Данный котел был разработан для установки внутри топки секционного чугунного котла для увеличения его тепловой мощности и улучшения показателей, но может явиться самостоятельным энергоагрегатом.

Котел со слоевым пульсирующим горением по рис. 3 также является модульным, так как в общем водяном объеме смонтировано несколько параллельных жаровых труб, каждая из которых представляет собой камеру пульсирующего горения. Основные ее размеры: диаметр – 100...500 мм, длина – 2...3 м, теплообменные трубы диаметром 16...30 мм, длиной 1,5...2 м, гибы в стенку жаровой трубы. Возможна компоновка прямых труб с трубной доской. В горелку без напора (в горелке открытый уровень) подается жидкое топливо или низконапорный газ (0,6...2 кПа). Режимные характеристики одной камеры: расход топлива – 5...20 кг/ч, расход воды в теплообменных трубах – 100...1000 кг/ч, тепловая мощность – 40...200 кВт. Камера была испытана в стендовых условиях и опробована как генератор горячих газов на Минском заводе отопительного оборудования и в ряде строительных организаций для подогрева воды и плавления битума. Испытания показали удобство регулирования тепловыделения, надежность работы, простоту обслуживания. Такой модульный котел может быть мощностью 2...10 МВт и целесообразен для утили-

лизации газообразных и жидких горючих отходов, для работы на сбросном газе нефтедобычи и нефтепереработки. Основное достоинство — простота конструкции, малая удельная металлоемкость, отсутствие потребления электроэнергии.

Котлы с пульсирующим горением имеют следующие особенности:

1) **видимое отсутствие топки.** Процесс горения настолько интенсивен, что без опасения возникновения недожогов возможен теплосъем прямо с факела;

2) **возможное выпадение конденсата.** Интенсивный теплообмен на поверхностях нагрева при умеренной их величине приводит к переохлаждению продуктов сгорания; точка росы, с одной стороны, увеличивает КПД агрегата, с другой — требует высококачественных металлов труб и газоходов;

3) **гибкость компоновочных решений.** Камеры пульсирующего горения, являющиеся основой этих котлов, кроме малых удельных габаритов, допускают любую ориентацию, изменение формы, различные стыковки с другими элементами котлов;

4) **пониженные требования к топливу.** Сильная турбулизация при смесеобразовании позволяет сжигать низкосортные загрязненные топлива, распыляющее действие колеблющегося газового потока ведет к возможности снижения давления топлива перед форсункой (горелкой) и безнапорной подаче при слоевом пульсирующем горении;

5) **унификация по топливу.** В одной и той же конструкции можно сжигать широкую гамму топлив. Это объясняется, в частности, сближением эмиссионных характеристик факелов. Например, переход с жидкого на газообразное топливо требует замены только распылителей;

6) **снижение расхода энергии на собственные нужды.** Расход энергии на подачу воздуха для горения и удаления уходящих газов может быть сведен к нулю. Вентиляторы необходимы только для пуско-остановочных режимов;

7) **шум и вибрации.** Пожалуй, это главный фактор, препятствующий широкому использованию котлов с пульсирующим горением. Но его следует считать скорее субъективным тормозом, так как имеются целесообразные технические решения шумоглушения (теплообменник как акустическая нагрузка; компоновка модульных схем; газоходы с демпферами; изолированные котельные и др.), а вибрации при силе звука 90...120 дБА вполне переносимы котельным оборудованием;

8) **модульный принцип увеличения мощности.** Габаритное масштабирование для пульсирующего горения вряд ли применимо, поэтому следует считать оптимальными те размеры, которые приведены выше. Такие установки целесообразны для котлов малой и средней мощности. Для увеличения тепловой мощности агрегата до некоторой величины можно увеличивать количество установок, являющихся модулями. Выше была показана приемлемость этого решения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Попов В. А., Северянин В. С., Аввакумов А. М. и др. Технологическое пульсационное горение. — М.: Энергоатомиздат, 1993. — 320 с.