

Министерство энергетики и электрификации
СССР

КАЗАХСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ЭНЕРГЕТИКИ

В.С. СЕВЕРЯНИН

ИССЛЕДОВАНИЕ ГОРЕНИЯ ТВЕРДОГО
ТОПЛИВА В ПУЛЬСИРУЮЩЕМ ПОТОКЕ

(Специальность - теоретические основы теплотехники, №274)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Алма-Ата 1970 г.

Министерство энергетики и электрификации
СССР

КАЗАХСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ЭНЕРГЕТИКИ

На правах рукописи

В.С.СЕВЕРЯНИН

ИССЛЕДОВАНИЕ ГОРЕНИЯ ТВЕРДОГО
ТОПЛИВА В ПУЛЬСИРУЮЩЕМ ПОТОКЕ

(Специальность - теоретические основы теплотехники, №274

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Алма-Ата 1970 г.

Работа выполнена в котельно-топочном отделении Восточного филиала Всесоюзного ордена Трудового Красного Знамени тепло-технического научно-исследовательского института им. Дзержинского в 1963-1969 годах.

Научный руководитель - доктор технических наук КАЦНЕЛЬСОН Б.Д.

Официальные оппоненты:

член-корреспондент АН КазССР, доктор технических наук,

профессор РЕЗНЯКОВ А.Б.,

кандидат технических наук БУХМАН С.В.

Ведущее предприятие - Московский ордена Ленина Энергетический институт.

Автореферат разослан " _____ " _____ 1970 г.

Защита состоится " _____ " _____ 1970 г.

на заседании Ученого Совета КазНИИ Энергетики.

Просим выслать заверенный и скрепленный печатью отзыв в двух экземплярах по данной работе и принять участие в обсуждении её на защите.

Наш адрес: Алма-Ата, 12, ул. Космонавтов, 85.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке КазНИИ энергетики.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ СОВЕТА КазНИИ Энергетики

КАНД. ТЕХН. НАУК

Б.П. УСТИМЕНКО

Рост единичной мощности парогенераторов происходит в основном лишь за счет их масштабного увеличения без привлечения принципиально новых технологических процессов.

Основными факторами, обуславливающими размеры и условия работы парогенераторов, являются процессы горения и теплообмена.

Попыткой интенсифицировать топочные процессы в тривиальных факельных и слоевых способах сжигания в настоящее время является стремление реализовать запасы, ограниченные аэродинамическими показателями (циклонные, вихревые топки; сжигание в зажатом, псевдоожигенном слое и т.д.).

Наложение колебаний на поток горящего топлива приводит к новому способу сжигания, когда существенно изменяются условия горения и теплообмена.

Колебания могут быть принудительными (использование различных акустических генераторов, сирен, прерывателей потоков и т.д.) или характерным свойством систем, для которых периодическое изменение некоторых параметров является рабочим автоколебательным режимом (определенные режимы горения в высокофорсированных устройствах для сжигания - в некоторых горелках, камерах сгорания, реактивных двигателях и т.д.). Качество горения при этом может изменяться настолько, что приходится принимать специальные меры для подавления колебаний во избежание термических повреждений аппаратов. Второй аспект вопроса - использование этих режимов для получения больших тепловыделений, несоизмеримых по мощности с обычными процессами горения, а также для усиления теплообмена. Вполне очевидно, что по практическим соображениям удобнее использовать автоколебания самого топочного агрегата, чем принудительные колебания, генерируемые вспомогательными устройствами.

Аппарат, в котором сжигается топливо в пульсационном режиме на основе автоколебаний, принято называть камерой пульсирующего горения (К П Г). В зависимости от типа колебаний (гармонические или релаксационные) КПГ делятся на два типа: собственно КПГ и импульсные камеры.

Новизна явлений и методические сложности, вероятно, обуславливают недостаточную проработку проблемы пульсирующего горения.

По патентной литературе известно достаточно большое количество устройств пульсирующего горения, однако очень мало опубликовано работ, где можно найти описание физических особенностей процесса пульсирующего горения, анализ тенденций в этом явлении, разработку практически приемлемых схем КПП, особенности их работы, трудности при реализации способа пульсирующего горения.

Из ранних исследователей следует отметить Караводина, построившего в 1908 г. ГТУ с клапанной камерой; Рейнста, давшего несколько действующих схем КПП и указавшего на преимущества пульсирующего горения; Шмидта, чьи установки были использованы в качестве реактивных двигателей. В ФРГ в 50-х годах Зоммерсом была сооружена и опробована установка пульсирующего горения на пылеугольном котле малой мощности. Испытания дали хорошие результаты.

В настоящее время поиск приемлемых решений использования пульсирующего горения расширяется. Свидетельство этому - рост числа новых патентов на устройства пульсирующего горения (СССР, США, ФРГ, ЧССР, ЮАР и т. д.), а также появление исследовательских работ, посвященных горению и теплообмену в нестационарном потоке. Нужно подчеркнуть ведущую роль советских исследователей в этом вопросе. Всесоюзные конференции по проблемам пульсирующего горения показали, что как теоретические, так и прикладные проработки имеют более высокий уровень, чем за рубежом. Многие задачи ставились и решались впервые в СССР.

Ведущиеся в настоящее время работы по позитивному решению проблемы пульсирующего горения можно разбить на три группы.

Первая группа - разработка конструкций КПП. Такие работы в СССР ведутся в основном в ЦКТИ и ВоФТИ. Из зарубежных работ следует выделить исследования в Шеффилде, где Хэнби и Браун совсем недавно построена пылеугольная КПП. Котлостроительные фирмы ФРГ, как указывает Бахмайр, уделяют особое внимание лабораторным проработкам устройств пульсирующего горения.

Вторая группа работ - исследование физических явлений при пульсирующем горении. В СССР начало этим работам положено в институте азотной промышленности (ГИАП). Сейчас указанными исследованиями занимается Мосгазпроект, где подробно изучены режимы

возбуждения газовых горелок, Казанский университет (исследуются процессы колебаний при сгорании газовых топлив в установках лабораторного типа), Институт металлургической теплотехники (выявляются причины колебаний в кауперах), Казахский институт энергетики (экспериментально и теоретически изучается горение топливных частиц в пульсирующем потоке), ЦКТИ и Ленинградский политехнический институт (теоретически определяются условия возбуждения систем, исследуются внутринамерные параметры), ВоФБИ (горение одиночных частиц, изучение условий смесеобразования, воспламенения, самоочистки). Вопросами, связанными с пульсирующим горением, занимаются также Уралэнергочермет, Киевский политехнический институт, Чувашский университет, Акустический институт, Институт химфизики АН СССР и др. Зарубежные открытые публикации посвящены в основном проблеме подавления пульсаций в высокофорсированных двигателях (НАСА, ряд институтов США, Англии, ФРГ).

Третья группа - исследование тепломассообмена в пульсирующем потоке. Отечественные исследования в этой области главным образом следует отнести ЦКТИ. Работы по этой теме проводились и в некоторых институтах Сибирского отделения АН СССР. Зарубежные исследования отражены во многих периодических изданиях.

В настоящей работе ставились задачи, обусловленные следующими соображениями.

Общепринято мнение, что мелкие частицы, участвуя в колебаниях газа, почти им не обдуваются. Опыты по сжиганию пыли в КПП опровергают такой вывод. Необходима поэтому более детальная проверка условий движения частиц в пульсирующей газовой среде.

Очень мало опубликовано экспериментальных количественных зависимостей по скорости горения частиц топлива в низкочастотном потоке, характерном для КПП; данных по форме выгорания частиц совсем нет; экспериментальное определение поведения близлежащих слоев газа у поверхности частицы в таком режиме в обозримой литературе не встречается. Эти недостающие звенья затрудняют построение физической картины горения частиц топлива в пульсирующем потоке.

Конструкции КПП, их действие и особенности, показатели работы и т.д. описаны в общем крайне скудно, часто эти сведения носят рекламный субъективный характер. В известных работах не

показаны основные условия существования устойчивого рабочего режима твердотопливных КПП, не раскрыты трудности при реализации пульсирующего горения твердого топлива, не предлагаются рекомендации для сооружения промышленных КПП.

Недостаточность данных по горению твердого топлива в низкочастотном пульсирующем потоке, важность изучения механизма горения в КПП, стремление реализовать потенциальные возможности нового способа сжигания побудили постановку настоящей работы в направлении решения задач, исходя из указанных положений.

Работа состоит из двух частей. Первая из них посвящена изучению механизма горения сферических топливных частиц в пульсирующем потоке, вторая - конструктивным проработкам твердотопливных КПП.

О ГОРЕНИИ ЧАСТИЦ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА В ПУЛЬСИРУЮЩЕМ ПОТОКЕ

При заданных температурных условиях и химической обстановке процесс горения, как известно, зависит в определенной степени от аэродинамического режима, который можно охарактеризовать скоростью обдувания.

Для случая горения частиц в стационарном потоке имеется много работ, в которых связывается скорость горения с обдуванием. Аналогичных же исследований для пульсирующего потока, подробно вскрывающих этот вопрос, почти нет.

Одной из причин увеличения скорости горения топлив в КПП следует считать увеличение скорости обдувания частицы топлива пульсирующим потоком. Обычно в связи с этим говорят о коэффициенте увлечения, который представляет собой отношение амплитуды скорости (смещения) частицы к амплитуде скорости (смещения) газовой среды. При этом подразумевается, что для коэффициента увлечения, близкого к 1, относительная скорость частица - газ пренебрежима. Представляет, однако, интерес уточнить это явление, рассмотрев также влияние фазовых сдвигов между колебаниями газа и частицы на скорость обдувания.

Для движения частицы в одномерном потоке имеем

$$m \frac{dv}{dt} = c \frac{F}{2} z^2 S$$

(m - масса частицы; V - её скорость; C - коэффициент сопротивления; ρ - плотность газа; Z - скорость обдувания; S - площадь частицы).

Для потока с продольными синусоидальными колебаниями это уравнение

$$\frac{d\tilde{z}}{dx} = \cos x - A\tilde{z},$$

где

$$\tilde{z} = \frac{W-V}{W_0}; \quad x = \frac{2\pi}{T} \tau; \quad A = K \frac{\rho_s}{\rho_g} \frac{T \nu}{d^2}$$

(здесь W - скорость потока; W_0 - её амплитудное значение; T - период колебаний; τ - текущее время; ρ_s - плотность материала частицы; d - ее размер; ν - коэффициент кинематической вязкости; K - коэффициент, зависящий от функции $C=f(Re)$, при связи между C и числом Рейнольдса в виде $C \cdot Re = 24$ коэффициент $K=9/\pi$).

Безразмерная величина A является параметром увлечения частицы колеблющимся потоком.

Для достаточно малых Re уравнение легко решается, и, допустив гиперболическую зависимость между C и Re для некоторого диапазона Re , получим безразмерную скорость обдувания частицы

$$\tilde{z} = \frac{1}{1+A^2} \sin x + \frac{A}{1+A^2} \cos x - \frac{A}{1+A^2} \exp(-Ax).$$

Максимальное значение \tilde{z} в установившемся режиме

$$\tilde{z}_0 = \frac{1}{\sqrt{1+A^2}}$$

для аргумента, определяемого выражением

$$\operatorname{tg} x = \frac{1}{A}.$$

Сдвиг фаз между вектором скорости потока и вектором скорости обдувания

$$\varphi = \frac{\pi}{2} - \operatorname{arctg} \frac{1}{A}.$$

Максимальная скорость частицы

$$\tilde{V}_0 = \frac{A}{\sqrt{1+A^2}}$$

Количество переходных циклов

$$N_{\text{пер}} = \frac{3}{2\pi A}.$$

В более общем случае уравнение решено на ЭЦМ "Урал-2".

Для этого исходное уравнение было приведено к виду

$$\frac{d(Re)}{dx} = R \cos x - B \psi Re,$$

где

$$R = \frac{W_0 d}{\nu}; \quad B = \frac{3}{4} \frac{\rho_s}{\rho_g} \frac{T \nu}{2\pi d^2}; \quad \psi = f(C, Re).$$

Просчитывались варианты:

$$W_0 = 0,1; 1; 5; 10 \text{ м/сек,}$$

$$T = 0,2; 0,02; 0,001 \text{ сек,}$$

$$d = 50; 500; 5000 \text{ микрон, - для таких начальных}$$

условий:

$$Re_0 = 0 \text{ при } \chi_0 = 0; \quad Re_0 = R \text{ при } \chi_0 = 0;$$

$$Re_0 = 0 \text{ при } \chi_0 = \frac{\pi}{2}; \quad Re_0 = R \text{ при } \chi_0 = \frac{\pi}{2} \dots$$

Вариацией начальных условий можно проследить влияние адекватных параметров - начальной скорости частицы и среднерасходной скорости потока.

Машинный расчет позволяет заключить следующее.

1. Допущения, введенные при аналитическом решении уравнения движения частицы, не ведут к ощутимым погрешностям, так как

а) в области малых чисел Рейнольдса, наиболее интересных в отношении \tilde{z} и ψ , как показывают вычисления, допущения не играют роли,

б) в области больших чисел Рейнольдса частица практически неподвижна, поэтому здесь $\tilde{z} = 1$, $\psi = 0$, и аналитический расчет по параметру A , который в этом случае мал, дает те же значения.

2. Переходный режим движения частицы характеризуется не только изменением амплитудно-фазовых соотношений по колебаниям, но и изменением начальной скорости частицы, если таковая имеется; коэффициент ослабления начальной скорости (или снижения влияния постоянной слагающей скорости потока) увеличивается с уменьшением частот и размеров частиц.

Таким образом, расчет показывает, что даже мелкие частицы подвергаются значительному обдуванию в пульсирующем потоке.

Так, для частицы размером 100 микрон в потоке с температурой 1000°C при $f = 50$ гц параметр увлечения $A = 0,29$ и $\tilde{z} = 0,87$, т.е. "используется" 87% скорости потока.

Такое обдувание можно сравнить с обдуванием стационарным потоком, приняв выражение для скорости витания W_0 .

Рассмотрев отношение

$$\frac{\tilde{z}}{W_0} = \frac{\sqrt{1+A^2}}{\sqrt{\frac{g}{4} \frac{d}{R} \frac{g}{c} d}} \sim \frac{d^2}{d^{2.5}}$$

можно заметить, что с уменьшением размера частиц отличие между обдуванием пульсирующим и стационарным потоками увеличивается в пользу первого потока.

Приведенные выше положения показывают огромную роль аэродинамических характеристик пульсирующего потока в поведении частиц в нем, и, следовательно, нужно ожидать существенного влияния качества этого потока на скорость горения топливных частиц.

Последующие исследования данного раздела работы посвящены экспериментальному вскрытию этой зависимости.

Эта серия опытов проводилась на установке, представляющей собой трубчатую печь, в которой располагалась исследуемая часть, обдуваемая потоком воздуха, подаваемого из подогревателя дутьевым устройством; пульсации потока возбуждались пульсатором поршневого типа. Параметры исследования брались в таких пределах: температура в печи - от 600 до 1100°C; среднерасходная скорость потока - до 10 м/сек; частота колебаний - до 70 герц; амплитуда переменной скорости - до 14 м/сек; размер частиц - от 2 до 10 мм; смещение газовой среды - до 130 мм; температура частиц - до 1550°C.

Опыты показали, что наложение на поток пульсаций значительно увеличивает скорость горения топлива. Например, для частицы с начальным размером 3-4 мм при ее температуре 1200-1300°C, реагирующей в воздушном потоке со скоростью его 3-4 м/сек, пульсации с частотой 20-30 герц приводят к увеличению скорости горения в 1,9-2,2 раза по сравнению со скоростью горения в том же стационарном потоке. Вместе с тем имеются такие пульсационные режимы, когда скорость горения становится ниже, чем в стационарном потоке. Эти случаи относятся, например, к осциллирующему потоку с малыми пульсациями (для частицы диаметром 3-4 мм при амплитуде осциллирующей скорости 0,3-0,6 м/сек скорость горения снижается почти вдвое по сравнению с естественной конвекцией).

Для пульсирующего потока (имеющего переменную и постоянную слагающие скорости) отношение скорости горения в пульсирующем потоке к скорости горения в стационарном потоке с той же постоянной скоростью увеличивается со снижением величины среднерасходной скорости (например, при уменьшении этой скорости с 7 до 3 м/сек это отношение увеличивается в 1,12 раз).

Влияние размеров частицы на скорость ее горения в пульсирующем потоке аналогично таким же зависимостям для стационарного потока. Специфичность такого влияния проявляется при уменьшении постоянной слагающей скорости потока, когда он по своим характеристикам приближается к осциллирующему. В последнем случае с уменьшением размера частицы при малых колебаниях потока увеличивается снижение скорости горения, но зато по мере увеличения пульсаций быстрее наступает превышение скорости горения в таком потоке по сравнению с горением в стационарном с той же постоянной скоростью течения, причем темп роста скорости горения выше, чем для более крупных частиц.

При повышении температуры частицы эффект от пульсаций потока возрастает (см. рис. I).

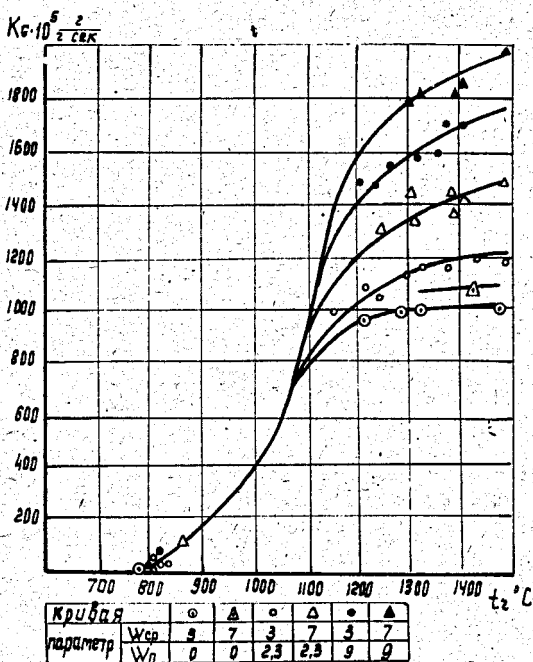


Рис. I. Зависимость скорости горения от температуры частицы при разных пульсациях

При увеличении температуры частицы с 1200 до 1400°C при амплитуде переменной скорости 2,3 м/сек скорость горения увеличивается на 13%, при амплитуде 9 м/сек - на 21%. Для меньших частиц указанный рост скорости горения выше, чем для крупных. В области температур частицы 700-900°C пульсации потока почти не влияют на скорость реакции.

Влияние аэродинамических качеств пульсирующего потока на скорость горения частицы в условиях эксперимента можно обобщить эмпирической зависимостью, изображенной на рис.2. Сюда включены опытные данные по стационарному потоку и других авторов.

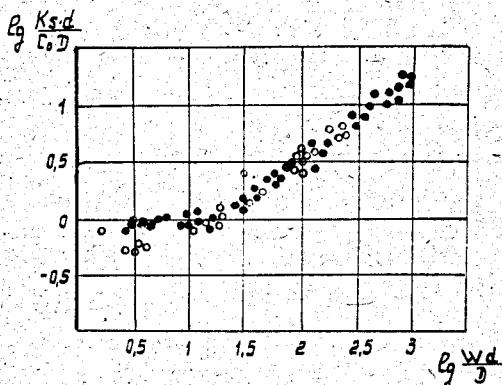


Рис.2. Зависимость скорости горения от диффузионного критерия:

- - стационарный поток,
- - пульсирующий поток.

В критериальном виде зависимость между интенсивностью горения и режимом обдувания можно представить в таком виде:

$$\lg \left(\frac{K_s d}{C_o D} \right) = 0,5 \left[\lg Pe + \exp(-5,5 \lg Pe) - 1 \right].$$

Здесь K_s - поверхностная скорость горения; d - размер частицы;

C_o - концентрация кислорода в потоке; D - коэффициент диффузии; Pe - критерий Пекле.

Своеобразие горения частицы в пульсирующем потоке заставляет особо рассмотреть вопрос о микрокинетике выгорания индивидуальной частицы. Эта задача в настоящей работе аппроксимируется исследованием формы выгорания сферической частицы в пульсирующем потоке.

Предыдущие опыты на потоке, присущем автоколебательным системам, показали внешнее отличие формы выгорания от выгорания и в стационарном потоке, и в ультразвуковом поле. Было замечено, что в рассматриваемых условиях выгорание в той или иной степени "округляет" частицу.

Специальные опыты показали, что эксцентриситет выгорания (отношение разности уменьшившихся радиусов частицы по оси потока: против потока и по потоку, - к диаметру частицы) для пульсирующего потока в общем случае меньше, чем для стационарного. В стационарном потоке с ростом его скорости эксцентриситет выгорания быстро растет; в осциллирующем он равен нулю. В пульсирующем потоке величина эксцентриситета зависит от отношения амплитуды переменной скорости к среднерасходной скорости потока: с увеличением этого отношения эксцентриситет снижается, но при некотором значении рассматриваемого отношения эксцентриситет выгорания несколько увеличивается, а затем при дальнейшем росте пульсаций снова уменьшается (рис.3).

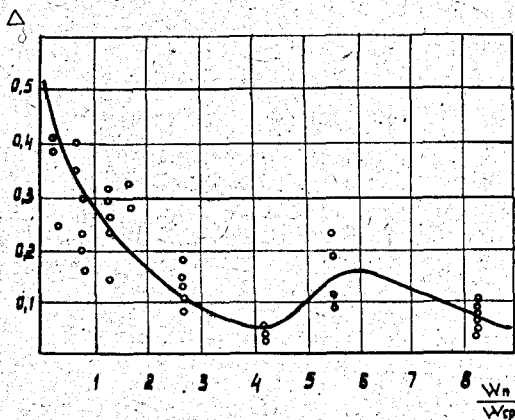


Рис.3. Влияние степени пульсации потока на эксцентриситет выгорания

Путем визуализации газовой среды вокруг частицы, обдуваемой пульсирующим потоком, а также фиксацией потоков при помощи скоростной кинокамеры и прямым фотографированием было обнаружено, что существуют два характерных режима обтекания горячей частицы:

а) частица окутана облаком-пламенем, которое пульсациями лишь деформируется; облако не сходит с частицы, ее поверхность с потоком не соприкасается; этот режим присущ слабым пульсациям при малых среднерасходных скоростях, и особенно осциллирующему потоку (рис.4,а);

б) с частицы полностью срывается пламя, ее поверхность в определенные моменты совершенно оголяется; центр колебаний пламени с увеличением среднерасходной скорости смещается по потоку; этот режим свойствен пульсирующему потоку с амплитудой колебаний в несколько раз большей размера частицы (рис.4,б).

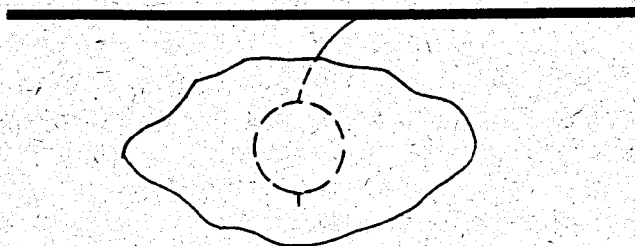
Резюмируя эти исследования (сопоставив данные по скоростям горения частицы в зависимости от аэродинамического режима, по эксцентриситету выгорания и по визуализации потоков вокруг частицы), можно представить физическую картину горения одиночной частицы твердого топлива в пульсирующем потоке следующим образом.

Возьмем стационарный поток с некоторой постоянной скоростью, в который помещена горячая частица. Будем на этот поток накладывать постепенно увеличивающиеся пульсации.

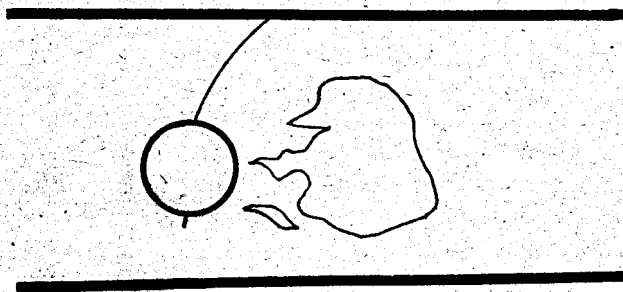
При слабых пульсациях не происходит существенной деформации пограничного слоя вокруг частицы, но внешние его части размываются, и диффузия кислорода на передней полусфере снижается, а на кормовой - несколько увеличивается (усиление турбулизации аэродинамического следа позади частицы, утолщение слоя спереди из-за его "разбухания"). Эксцентриситет выгорания поэтому снижается, скорость горения возрастает за счет увеличения поверхности реагирования на корме частицы.

Далее с ростом пульсаций образуется облако продуктов горения вокруг частицы, диффузия кислорода намного ухудшается и рост скорости горения затормаживается, а эксцентриситет продолжает снижаться.

Дальнейший рост пульсаций разрывает пограничный слой, оставляя у самой поверхности только тонкий подслой. В этом режиме



а



б

Рис. 4. Поведение пламени вокруг частицы, горячей в пульсирующем потоке. Два характерных режима обдувания:

а) частица окутана пламенем; б) пламя полностью срывается с частицы (копии с фотографий)

становится ощутимой постоянной составляющей скорости потока, поэтому эксцентриситет несколько повышается, с корость горения резко возрастает.

Последующий рост пульсаций снижает влияние постоянной составляющей скорости потока, режим обдувания приближается к осциллирующему, т.е. эксцентриситет выгорания приближается к нулевому значению, скорость горения продолжает быстро расти.

Имея изложенный материал, можно предложить следующую схему расчета скорости горения частиц твердого топлива в пульсирующем потоке.

1) Определяется амплитуда переменной скорости потока. Для акустического случая, в частности,

$$W_n = \frac{p}{\rho c},$$

где p - амплитуда переменного давления, легко определяемая приборами; ρc - акустическое сопротивление газа.

2) Вычисляется относительная скорость обдувания частицы:

$$\bar{z} = \frac{1}{\sqrt{1+K^2}},$$

амплитуда абсолютной скорости содувания:

$$z = \bar{z} \cdot W_n.$$

3) Вычисляется критерий Пекле:

$$Pe = \frac{W_n d}{D},$$

причем

$$W_n = \frac{1}{2} W' \frac{1}{f u \tau} + \frac{W_n}{\sqrt{2}} \bar{z}$$

(здесь τ - время, за которое определяется K^2 ; f - частота колебаний; u - коэффициент ослабления начальной скорости частицы или ослабления влияния среднерасходной скорости потока, для обычных случаев $\tau \approx 1/fu$, W' - модуль алгебраической суммы начальной скорости частицы и среднерасходной скорости потока).

4) По эмпирической зависимости

$$\lg\left(\frac{K_s d}{c_0 D}\right) = f(Pe)$$

непосредственно определяется поверхностная скорость горения частицы.

Уточнение механизма горения частицы твердого топлива в пульсирующем потоке позволяет более обоснованно подходить к сооружению КИГ и анализу их работы.

Изложенный экспериментальный материал применительно к реальным условиям сжигания топлив позволяет сделать следующие выводы.

Акустическая схема топочного устройства должна реализовать максимальные амплитуды колебаний газа. При подаче топлива в акустический торец возможен ввод в район воспламенения холодного воздуха, вторичный (третичный) воздух следует максимально подогреть, желателен также предварительный подогрев топлива. При большом значении параметра увлечения A возможна произвольная компоновка устройства.

СХЕМЫ ТВЕРДОТОПЛИВНЫХ КПП

Отсутствие достаточного количества исходного проектировочного материала для твердотопливных КПП обусловило поисковый характер конструктивных разработок.

Вначале была сооружена и испытана КПП по аналогии с жидкостной КПП по обычной схеме: клапан - горелка - камера воспламенения - резонансная труба.

Длительного устойчивого режима по пульсациям при сжигании угольной пыли в ней получить не удалось; пульсации существовали лишь до тех пор, пока хватало тепла, аккумулированного футеровкой при растопке камеры на жидком топливе.

Анализ работы этой КПП привел к разработкам последующих конструкций, в которых успешно сжигалось пылевидное топливо в пульсационном режиме.

Дипольная КПП (рис. 5, а) представляет собой цилиндрическую полость с сужением посередине. Внутри этого диполя, по его оси, проходит резонансная труба меньшего сечения, чем диполь. Резонансная труба начинается в районе сужения диполя и выходит из него наружу через один из торцов. Соотношение размеров диполя и резонансной трубы подчиняется условию $f_g = f_{pr}$ (f_g - собственная частота колебаний газа в диполе; f_{pr} - то же в резонансной трубе). Воздух подается в полости диполя тангенциально. Аэрозоль через трубу, охватывающую в виде рубашки резонансную трубу там, где она проходит через диполь, подается в район сужения

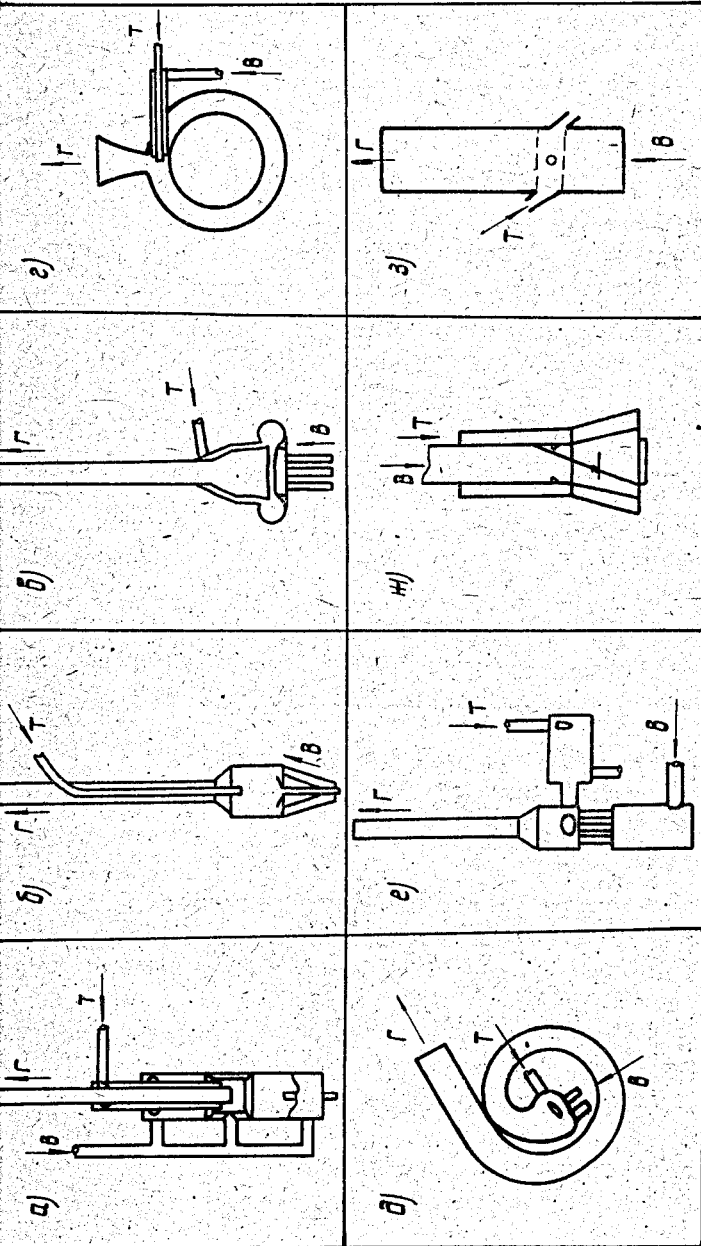


Рис. 5. Схемы камер пульсирующего горения: Г - подача топлива; В - воздух; Т - выход газа

диполя. Камера устойчиво работала на холодном воздухе при расходе пыли до 300 кг/час (диаметр диполя 300 мм, общая длина около 4 м). Акустические измерения в камере подтвердили правильность предположений при проектировании.

В коаксиальной КПП (рис.5,б), выполненной по обычной схеме, камера воспламенения - резонансная труба, топливо подавалось по пылевой трубе, расположенной внутри резонансной трубы, причем ввод топлива осуществлялся со стороны выхлопа КПП, выход - на противоположный торец камеры воспламенения. Ввод воздуха осуществлялся через конические аэродинамические клапаны или под наддувом тангенциально в переднюю часть камеры воспламенения.

В этих типах КПП подвод тепла к топливу в процессе его подготовки производился через стенку. Далее были разработаны и испытаны КПП, где подготовка топлива осуществлялась за счет аэродинамических факторов, а также ступенчатого сжигания.

В форкамерной КПП (рис.5,в) подготовка топлива идет в тороидальной форкамере, кольцом охватывающей камеру воспламенения, благодаря циркуляции загорающегося топлива и лучистому и конвективному теплообмену от основного факела. Аэросмесь подается в форкамеру тангенциально, вторичный воздух - через аэродинамический клапан на торце основной камеры. В остальном эта камера аналогична предыдущим.

Стремление полнее использовать циркуляционные свойства тора привело к опробованию такого элемента в качестве самостоятельного топливopодготовительного устройства и камеры горения.

Собранная по такой схеме кольцевая КПП (рис.5,г) представляет собой кольцевой замкнутый канал, имеющий выхлопное отверстие в любом месте. Кольцевая КПП работает в режиме мощных низкочастотных релаксационных колебаний и относится к типу импульсных камер. Топливо и воздух вводятся по оси канала.

Резкое сокращение размеров КПП, обусловленных наличием резонансной трубы, может дать сворачивание этой трубы в плоскую спираль, при этом увеличивается вентильный эффект устройства. Спиральная КПП (рис.5,д), смонтированная по такой схеме, напоминает валторну, причем камера воспламенения с топливо- и воздухопроводами располагается внутри спирали, выхлоп газа и акус-

тических импульсов - на внешнем витке спирали. Особенно эффективными такие устройства могут стать тогда, когда выхлоп из него направлять на горящее топливо. При помощи компактных "иницирующих" камер можно интенсифицировать дожигание, воздействуя на горящую пылевзвесь, слой кускового топлива, кипящий слой и т.д.

Примером ступенчатой КПГ может служить камера с предвключенным циклоном. По этой схеме (рис.5,е) циклон конструктивно и функционально отделен от самой КПГ. Угольная пыль подается в этот циклон; расход воздуха в циклон устанавливается таким, чтобы выделяющееся в циклоне тепло от воспламеняющейся пыли расходовалось в основном на газификацию угля. Субпродукт из предвключенного циклона поступает в основную камеру. Вторичный воздух в ту же камеру поступает через аэродинамические клапаны из напорного ресивера-резонатора. Дожигание коксового остатка идет в резонансной трубе.

Увеличить относительное смещение среда-частица можно путем использования поперечных колебаний, например, струи окислителя, входящей в поток горячего. Устройство, использующее этот принцип, представляет собой три прямооточных канала (рис.5,ж). Внутри среднего канала установлен плоский шибер с незафиксированной осью вращения. При подаче напорного потока в этот канал шибер в автоколебательном режиме генерирует в выходящем потоке поперечные пульсации.

В порядке поиска были разработаны некоторые конструкции, позволяющие осуществить пульсирующее горение крупнокускового топлива. После ряда предварительных опытов была сооружена экспериментальная топка (рис.5,з), состоящая из вертикальной шахты и двух колосниковых решеток, расположенных примерно на $\frac{1}{4}$ высоты снизу шахты. Топливо загружалось между решетками. В этой топке удалось осуществить режим Рийке; используя эффект Лемана, колебания можно усилить, интенсифицируя теплообмен на поверхностях нагрева. В опытах зафиксировано улучшение горения и повышение производительности по сравнению со сжиганием на стационарном дутье.

Работа описанных выше КПГ и некоторых других камер позволила выявить характерные особенности в реализации способа пульсирующего горения твердого топлива.

АНАЛИЗ РАБОТЫ ТВЕРДОТОПЛИВНЫХ КПП

Во время опытов в КПП сжигался челябинский уголь.

Основные характеристики топлива: $Q_{\text{н}}^{\text{с}} = 4200-4600$ ккал/кг, $W^{\text{с}} = 8-12\%$, $A^{\text{с}} = 25-30\%$, $V^{\text{с}} = 41\%$, $R_{99} = 60-65\%$, $R_{200} = 25-28\%$.
Плавкостные характеристики шлага: $t_1 = 1110^{\circ}\text{C}$, $t_2 = 1280^{\circ}\text{C}$,
 $t_3 = 1330^{\circ}\text{C}$.

Опыты убедительно показали, что нормальное воспламенение пыли в камере воспламенения является непременным условием существования пульсационного режима. Если фронт воспламенения затягивался дальше по газовому тракту, осциллограмма давления переходила в шумовую и качество горения резко ухудшалось.

Разбор действия испытанных КПП привел к выводу, что для их надежной работы необходимо:

а) осуществить предварительную подготовку топлива до ввода его в камеру воспламенения для надежного существования там видимого пламени;

б) геометрическая и акустическая схемы установки (воздуховоды, клапаны, камера воспламенения, места ввода топлива, воздуха, расположение факела и т.д.) должны быть такими, чтобы возникающие акустические явления были основными в обратной связи автоколебательной системы. Для релаксационных камер качества колебаний обусловлены геометрией камеры и свойствами топлива.

Под предварительной подготовкой топлива подразумевается следующее: 1) термическая обработка частиц — или путем окислительного пиролиза (глубокая газификация при горении с большим недостатком воздуха), или путем высокотемпературного нагрева первичного воздуха, или физическим нагревом массы топлива; 2) акустическое воздействие на частицы для интенсификации подготовительных стадий.

Такая подготовка топлива ведет к реализации критерия Рэлея; на жидком и газообразном топливе осуществить это условие значительно легче.

Работа исследованных КПП характеризуется следующими параметрами. Расход топлива (пыль челябинского бурого угля) до 300 кг/час, амплитуда переменного давления $\pm 0,12$ атм, частота колебаний

0-60 герц, теплонеприятие объема КПГ свыше $14 \cdot 10^6$ ккал/м³ час, потеря с механическим недожогом I-5%, коэффициент избытка воздуха 1,7 - 1,1 температура воздуха 30-40°C, температура в камере 1600-1700°C, средняя скорость газов в КПГ 100-200 м/сек, коэффициент эродинамического сопротивления установки 1,5-2, распределение воздуха: первичный 8-15%, вторичный 60-70%, третичный 20-30%, коэффициент шлакоулавливания 30-50%, содержание горючих в шлаке 0%, уносе 5-20%, длительность растопки 5-10 мин.

Опытами выявлено, что амплитуда давления возрастает с увеличением тепловой нагрузки и с уменьшением коэффициента избытка воздуха. Следует подчеркнуть автоматичность действия КПГ: попытки организовать режим мероприятия, не связанными с акустикой и обдуванием критерия Рэлея (циркуляция топочных газов, создание в камере вихрей, эжекция газов и т.п.), камера не "приемлет"; если найдена правильная схема, камера сама управляет процессом, поэтому для регулирования мощности можно ограничиться лишь двумя внешними воздействиями - подачей топлива и воздуха, а для самовсасывающих КПГ отпадает и второе. При этом перегруз по топливу для последних КПГ наступает раньше.

Можно оценить скорость горения частиц угля в КПГ следующим образом:

$$K_s = \frac{dR}{\delta \tau} \frac{g}{\text{см}^2 \text{сек}}$$

При времени τ нахождения частицы в тракте КПГ, равном в среднем 0,02-0,05 сек, для частиц, например, размером 100 микрон, полностью сгорающих в КПГ, поверхностная скорость горения будет лежать в пределах 0,05-0,1 г/см² сек. Такая интенсивность горения в крайней мере на порядок выше скорости горения в обычных факельных топочных устройствах; ту же величину дает сравнение теплонеприятий топочных объемов для КПГ и камерных топков.

За время нахождения в пределах тракта КПГ частица успевает пережить воздействия от пульсаций

$$\frac{\tau}{T} = \frac{c \cdot a}{W_{cp} \cdot \lambda} = \frac{a}{4 W_{cp}} \text{ раз,}$$

λ - длина звуковой волны, для четвертьволновой схемы длина КПГ $\ell = \frac{1}{4} \lambda$; a - скорость звука).

Рис.6 поясняет эти выкладки; здесь показаны траектории частиц газа для больших среднерасходных скоростей (линия 1) и для меньших (линия 2); слева - эпюра стоячей волны, синусоиды - ее извертки во времени.

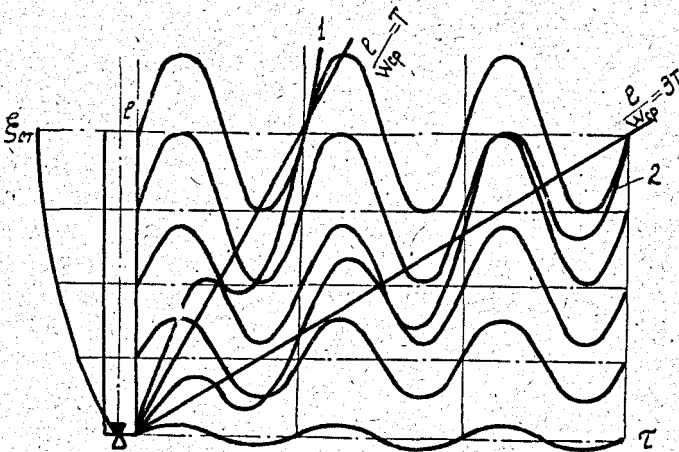


Рис. 6. Смещение частиц газа по тракту КПГ

Полученные реальные плотности тепловыделения несколько выше тех значений $\frac{BQ}{V}$, которые можно было ожидать на основании экспериментов с индивидуальной частицей. Помня об условиях экспериментов, нужно предположить, что КПГ обладают еще другими интенсификаторами горения, кроме увеличения относительных скоростей частица-газ. Повышению скоростей горения в КПГ, вероятно, способствуют переменное давление, переменная температура, чрезвычайно развитая турбулизация, наличие химически активных центров, постепенный рост амплитуд скоростей по тракту, волновые явления и т.п.

Для опробованных КПГ не ставилась задача получения высоких экономических показателей, установки служили для выявления особенностей пульсирующего горения твердого топлива в полупромышленном

масштабе, однако уже можно заметить отличие этих показателей от экономических параметров обычных способов сжигания, если взять тот же уровень тепловыделения.

Большинство камер не было футеровано, что, однако, не ухудшало устойчивости горения, несмотря на малый объем топочного пространства.

В опытах на охлаждаемых КПП (без футеровки) почти весь тракт ощутимо не загрязнялся, шлак в виде гранул выносился потоком в выхлопной объем. В футерованных камерах шлак образовывал равномерные отложения типа гарниссажа. В выхлопном объеме можно успешно собирать и, если нужно, плавить шлак.

Следует подчеркнуть относительную простоту конструкций и невысокую стоимость устройств пульсирующего горения, а также простоту их эксплуатации. Недостатками КПП являются излучение шума и распространение вибраций, высокие значения тепловых потоков на ограждающие поверхности. Известными приемлемыми мероприятиями эти проблемы вполне разрешимы.

Проведенная работа дает основание рекомендовать установку устройств рассмотренного типа для повышения плотности тепловыделения, интенсификации воспламенения и дожигания, снижения расходов на тягу и дутье, улучшения теплообмена, а также для акустической обдувки поверхностей нагрева. Схема КПП, ее компоновка, подготовка топлива, газоздушный тракт и т.д. должны рассматриваться в каждом конкретном случае.

В ы в о д ы

1. Поведение твердой частицы в пульсирующем потоке качественно отличается от ее состояния в стационарном потоке.

2. Обдувание частицы пульсирующим потоком намного эффективней воздействия на нее стационарным потоком. С уменьшением размера частиц обдувание стационарным потоком уменьшается быстрее, чем обдувание пульсирующим потоком.

3. Движение частицы в одномерном пульсирующем потоке удобно характеризовать параметром увлечения A .

4. Скорость горения частицы твердого топлива в пульсирующем потоке в общем случае выше, чем в стационарном, и зависит от степени пульсаций. Имеются пульсационные режимы, когда скорость горе-

ния, она понижается.

5. Физическая картина процесса горения частицы в пульсирующем потоке показывает, что пульсации изменяют как локальную поверхностную скорость горения, так и величину реагирующей поверхности.

6. Для незакрепленной топливной частицы можно рассчитать скорость горения, используя параметр A и эмпирическую зависимость $K_s = f(Pe)$.

7. Разработанные конструкции твердотопливных камер пульсирующего горения подтверждают высокие показатели процесса.

8. Для устойчивого существования рабочего режима этих устройств необходима более тщательная подготовка топлива; эта подготовка идет в самих камерах.

9. Правильно спроектированные и построенные установки пульсирующего горения просты, дешевы, легки в эксплуатации.

10. Достоинства процесса пульсирующего горения требуют широкого и смелого экспериментирования в промышленном масштабе.

Основное содержание работы изложено в следующих публикациях:

1. В.С.СЕВЕРЯНИН. О сжигании твердого топлива в пульсирующем потоке. "Теплоэнергетика", № I, 1969.

2. Б.Д.КАЦНЕЛЬСОН, В.С.СЕВЕРЯНИН, В.Я.ЛЫСКОВ. Исследование пульсирующего горения твердого топлива. Сборник докладов на 4-й конференции по пульсационному горению. Челябинск, 1968.

3. В.С.СЕВЕРЯНИН, Б.Д.КАЦНЕЛЬСОН. Некоторые вопросы вибрационного горения твердого топлива. Изд. Казанского университета, 1969.

4. Б.Д.КАЦНЕЛЬСОН, В.С.СЕВЕРЯНИН. Экспериментальное исследование горения сферической частицы электродного угля в пульсирующем потоке. Сборник докладов на Всесоюзной конференции по горению твердого топлива. Новосибирск, 1969.

5. В.С.СЕВЕРЯНИН. Сжигание уральной пыли в пульсирующем потоке. Сборник докладов на Всесоюзной конференции по горению твердого топлива. Новосибирск, 1965.

6. В.С.СЕВЕРЯНИН.Устройство для сжигания топлив в пульсирующем потоке.Авт.свид. № 200695. Бюлл.изобр. 17,1967.

7. В.С.СЕВЕРЯНИН,В.Я.ЛЫСКОВ.Устройство для сжигания топлив в пульсирующем потоке. Авт. свид. № 222580. Бюлл.изобр. 23,1968.

8. В.С.Северянин, В.Я.ЛЫСКОВ.Устройство для сжигания топлив в пульсирующем потоке. Авт.свид.№ 235893. Бюлл. изобр. 6,1969.

9. В.С.СЕВЕРЯНИН,В.Я.ЛЫСКОВ.Устройство для сжигания топлив в пульсирующем потоке. Авт.свид. № 237324. Бюлл.изобр. 8,1969.

10. В.С.СЕВЕРЯНИН,В.Я.Лысков. Камерная топка.Авт.свид. № 228216.Бюлл.изоб. 31,1968.

11. В.С.СЕВЕРЯНИН, В.Я.ЛЫСКОВ,А.М.ХИДИЯТОВ.Устройство для сжигания топлив.Авт.свид. № 251742. Бюлл.изоб. 28,1969.

Результаты исследований были доложены и обсуждены на Всесоюзных конференциях по горению твердого топлива в СО АН СССР,ИФХИМС (Новосибирск,1965-1969 гг), на 4-й конференции по пульсационному горению (Челябинск,1968), на совещании по высокофорсированным топочным устройствам (Ленинград,ЦКТИ,1969), на итоговой научно-технической конференции Ивановского энергетического института,1970 г.

Отдел научно-технической информации ВоФТИ

Ответственный за выпуск ХАЙРИСЛАМОВ Х.Ф.

СКМП ВЦ при Статистическом управлении Челябинской области
ФБ 00581. Подписано к печати 16/III-70 г.
Заказ № 16 от 17/III-70 г. Тираж 170 экз.