

На правах рукописи

В. Г. ВЕТРОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА
ИНТЕНСИФИКАЦИИ СЖИГАНИЯ
МЕЛКОЗЕРНИСТОГО И ПЫЛЕВИДНОГО
ТОПЛИВА В КРИВОЛИНЕЙНЫХ КАНАЛАХ
С ПРИМЕНЕНИЕМ ОГНЕУПОРНОЙ
СЛОЕВОЙ НАСАДКИ

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель —
член-корр. АН СССР,
профессор Л. Н. ХИТРИН

Москва — 1960

170659
ЦЕНТРАЛЬНАЯ НАУЧНАЯ
БИБЛИОТЕКА
А. Н. Киргизской ССР

ВВЕДЕНИЕ

Задача повышения интенсивности сжигания твердых топлив в топках паровых котлов продолжает оставаться весьма важной технической задачей. Одним из возможных путей решения этой задачи является, по-видимому, развитие и освоение циклонных топок.

В данной работе рассматривается возможность организации интенсивного сжигания мелкозернистых или пылевидных топлив методом, отличным от метода, используемого в циклонных топках, но имеющим, однако, в своей основе действие некоторых общих факторов.

Теоретический анализ процесса горения распыленного твердого топлива приводит к выводу, что основным интенсифицирующим фактором для повышения $\frac{Q}{V_{\text{топ}}}$ является увеличение концентрации топлива в зоне горения. По идее Л. Н. Хитрина и З. Ф. Чуханова одним из способов увеличения концентрации топлива является, например, создание топки в виде криволинейного канала. В этом случае происходит торможение движения частиц топлива в топке и возникают большие скорости потока относительно частиц, обуславливающие возрастание концентрации топлива и увеличение массопереноса.

Криволинейное движение наиболее просто можно создать, направляя поток аэровзвеси, например, в слоевую огнеупорную насадку (или в поперечный пучок тесно расположенных труб).

Такая насадка представляет собой систему криволинейных каналов и позволяет обеспечить сочетание положительных свойств пылевидного и слоевого способов сжигания (с жидким шлакоудалением).

В насадку необходимо подавать уже накаленное топливо, частицы которого должны улавливаться на вязкой пленке шлака, покрывающей куски огнеупора, и сгорать при высокой

концентрации. Дело сводится как бы к созданию в огнеупорной насадке из пылевидного топлива искусственного и непрерывно возобновляемого слоя.

Сжигание топлива в насадке осуществляется в условиях и по законам, близким к тем, которые характерны для сжигания в слое (небольшая длина зоны горения, высокие теплонапряжения на объем и сечение слоя). Этот слой обладает преимуществом по сравнению с обычным угольным слоем, так как здесь имеется возможность создавать крупнокусковой слой, отличающийся малым гидравлическим сопротивлением и малым уносом частиц топлива, более растянутой кислородной зоной и, практически, отсутствием зоны восстановления, благодаря чему в насадке могут достигаться максимальные (теоретические) температуры горения.

Система подачи накаливаемого топлива в насадку вместе с дутьем, т. е. по системе параллельного тока, соответствует именно тем условиям, которые в наибольшей степени благоприятствуют образованию жидкого шлака — частицы по мере озоления движутся в зону высоких температур; зола топлива плавится. Жидкий шлак стекает вниз через насадку вместе с раскаленными продуктами сгорания, что обеспечивает бесперебойное удаление шлака.

Для осуществления основной задачи эксперимента требовалось обеспечить в первую очередь устойчивое воспламенение топлива на входе в топку с насадкой и проверить на опыте возможность осуществления процесса интенсивного сжигания раскаленного твердого топлива в слоевой огнеупорной насадке с жидкими шлакоудалением, а также выяснить более детальную картину процесса и оптимальные условия его организации.

Наиболее радикальным способом обеспечения устойчивого зажигания твердого топлива следует признать его высокотемпературный нагрев до температуры, выше температуры воспламенения коксового остатка данного топлива. Такой нагрев естественным образом обеспечивается в разрабатываемых сейчас энерготехнологических установках для комплексного использования топлива на электростанциях.

Сжигание некоторых видов твердого топлива с малым выходом летучих веществ требует, по-видимому, создания специальных предтопок-нагревателей топлива в качестве первой ступени топочного агрегата, т. е. использования двухступенчатого приема сжигания (1, 2, 3, 4, 5).

Устойчивое воспламенение топлива с большим выходом ле-

тучих может быть осуществлено также и по более простой одноступенчатой схеме сжигания (4, 5), с использованием подогретого воздуха и рециркулирующих топочных газов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

§ 1. Описание опытных установок

Для решения поставленной задачи было создано две установки:

Двухступенчатая установка

Этот вариант был выполнен с наклонным расположением слоевой насадки, что удобно с точки зрения непрерывной подпитки насадки дробленным материалом.

Первая ступень установки: топка-нагреватель с кипящим слоем (или возможна также, например, аэрофонтанная топка); вторая ступень: топка с огнеупорной насадкой. Топливо из бункера транспортировалось шнеком в топку с кипящим слоем.

Первичный воздух подавался под решетку первой ступени (живое сечение решетки 2-3%). Диаметр шахты топки 1-ой ступени был около 150 мм. Нагретые в кипящем слое продукты неполного сгорания (газ, полукокс) поступали через окно, расположенное на высоте 600 мм от дутьевой решетки, в трубу перелива и далее в топку с огнеупорной насадкой.

Вторичный воздух в топку II-ой ступени подавали из щелевого сопла.

В объеме топочной камеры перед насадкой осуществлялось воспламенение и частичное сгорание топлива. Горящий поток поступал затем в насадку — слой, размещенный на охлаждаемой водой трубной решетке. Стенки топки с насадкой, обмурованные шамотным огнеупором, охлаждались водой.

Шлак, образующийся в насадке, стекал в шлакоприемник, а продукты сгорания отводились в дымовую трубу.

Основные исследования проводились с насадкой, выполненной из боя шамотного кирпича.

Одноступенчатая установка

Установка была выполнена с горизонтальным расположением слоевой насадки. Холодное топливо подавалось шнеком из бункера в магистраль, по которой поступал также первичный воздух. Образовавшаяся аэровзвесь попадала в форкамеру, где подхватывалась вторичным воздухом.

Воспламенение и сгорание топлива происходило в вертикальной шахте, в нижней части которой располагалась огнеупорная насадка. Шлаки стекали с насадки и трубной водоохлаждаемой решетки в шлакоприемник.

Площадь фронтального сечения насадки около $0,04 \text{ м}^2$.

Насадка выполнялась в основном из высокоглиноземистого огнеупора ($\text{Al}_2\text{O}_3=73\%$).

§ 2. Исследование эффективности нового метода сжигания и анализ опытных данных

Исследования производились на установившемся режиме работы топочного устройства, т. е. на том режиме, при достижении которого все параметры, характеризующие работу установки (нагрузка, температура, состав газа, сопротивление элементов и т. д.), во времени практически не изменялись.

Установившийся режим работы 1-ой ступени определялся в основном по температуре газовзвеси на выходе из топки с кипящим слоем. Контроль установившегося режима в 1-й ступени осуществлялся также и по накоплению материала, т. е. по изменению сопротивления кипящего слоя.

Режим работы второй ступени топки с насадкой считался установившимся лишь при условии достижения температуры жидкоплавкого состояния золы исследуемого топлива и покрытия всей поверхности насадки пленкой жидкого шлака.

В опытах производились измерения:

- расхода топлива и воздуха;
- состава исходного топлива, продуктов горения (газа, уноса золы, очаговых остатков) и коэффициента избытка воздуха;
- состава газа и температуры по длине факела и поперечным сечениям потока;
- сопротивления кипящего слоя, огнеупорной насадки и др. элементов топочного устройства.

Результаты испытаний двухступенчатой установки

1) Исследование условий нагревания твердого топлива в топке с кипящим слоем

Перед началом работы 1-я ступень установки — топка с кипящим слоем разогревалась дровами, после чего осуществлялась подача, зажигание и нагрев (за счет частичного сго-

рания) исследуемых видов твердого топлива: фрезерного торфа, полукокса фрезерного торфа, подмосковного бурого угля и эстонского сланца.

При проведении опытов на антраците, после розжига топки дровами, некоторое время работа кипящего слоя производилась на более легковоспламеняемом топливе — торфяном полукоксе с постепенным увеличением доли антрацита, после чего переводилась на работу только с антрацитом. 1-я ступень работала на холодном воздухе, подаваемом под дутьевую решетку в количестве от 10 до 35% теоретически необходимого для полного сгорания топлива.

Работа топочного устройства, в этом случае, принципиально отличается от обычной практики, когда стремятся к полному сжиганию топлива в кипящем слое.

Функция первой ступени заключалась лишь в нагреве топлива до возможно более высокой температуры. 1-я ступень установки — топка с кипящим слоем являлась работоспособным топочным агрегатом, обеспечивавшим устойчивое зажигание с нагревом до заданной температуры (в опытах от 500 до 1150°C) различных видов мелкозернистого и пылевидного топлива при удельной нагрузке на дутьевую решетку: для мелкозернистого топлива от $0,5$ до $4 \text{ т/м}^2\text{час}$ (нагрузка $4 \text{ т/м}^2\text{час}$ получена пока только для сланца и торфяного полукокса) и для пылевидного топлива от $0,5$ до $3 \text{ т/м}^2\text{час}$.

Однако для пылевидного топлива удельная нагрузка на решетку 1-й ступени в $3 \text{ т/м}^2\text{час}$ является, по-видимому, предельной с точки зрения удовлетворительной работы кипящего слоя.

Так, при нагрузке $\geq 3 \text{ т/м}^2\text{час}$ работа топки на пылевидных топливах: торфяном полукоксе и сланце приобретала неустойчивый, пульсирующий характер, в то время как при работе на мелкозернистых топливах: сланце и торфяном полукоксе кипящий слой работал устойчиво при нагрузке до $4 \text{ т/м}^2\text{час}$. Тепловая нагрузка слоя $(Q/R)_v^{в*}$ изменялась при этом от 3 до 18 млн. ккал/ $\text{м}^2\text{час}$ (или от 3,8 до 23 млн. ккал/ $\text{м}^3\text{час}$).

Действительное теплонапряжение топки 1-ой ступени было (за редким исключением) от 1 до 2,5 млн. ккал/ $\text{м}^2\text{час}$ (или от 1,4 до 3,5 млн. ккал/ $\text{м}^3\text{час}$).

Сопротивление кипящего слоя было в среднем в пределах

*) При подсчете видимого (суммарного) теплового напряжения топки $(Q/R)_v^{в}$ учитывалось все тепло, которое может выделиться в топке при полном сгорании топлива.

от 20 до 200 мм вод. столба, причем максимальное сопротивление было получено при работе на буром угле, сланце и антраците, т. е. на наиболее тяжелом (по удельному весу) топливе.

Скорость фильтрации в кипящем слое составляла 0,25—1,15 м/сек. Максимальная влажность рабочего топлива достигала 30%.

2. Исследование условия воспламенения и сгорания накаливаемого топлива во второй ступени установки

Исследование проводилось на следующих видах твердого топлива с большим выходом летучих веществ: торфе, буром угле и сланце.

Из топлив с малым выходом летучих веществ исследовалась возможность работы установки на антраците и торфяном полукоксе. Основные исследования работы топки проводились на торфяном полукоксе. Выбор такого типа топлива был связан с перспективностью применения торфа в энерготехнологических установках.

В начале испытания вторая ступень топки разогревалась на городском газе до 1500°C, после чего включалась в работу первая ступень установки.

Исследование условий воспламенения топлива.

Изучению условий воспламенения топлива во второй ступени установки предшествовали исследования условий воспламенения пылеугольного факела на открытом воздухе.

В этом случае условия, определяющие воспламенение аэрозвеси, были наименее благоприятными. В «открытом» факеле не происходило разогрева аэрозвеси от накаливаемых стенок или за счет рециркуляции горячих газов, а наоборот, имела место интенсивная теплоотдача от факела к подсосываемому холодному воздуху и холодным окружающим стенкам за счет лучеиспускания.

Воспламенение факела в этих условиях осуществлялось только за счет саморазогрева в процессе сгорания.

Минимальная температура подогрева топлива, обеспечивающая безотказное воспламенение его в «открытом» факеле, гарантировала устойчивое воспламенение в более благоприятных условиях, имеющих место в «закрытом факеле» — в накаливаемом тоннеле второй ступени топки перед насадкой.

Опыты показали, что устойчивое воспламенение в факеле мелкозернистого полукокса фрезерного торфа 0—5 мм (полный остаток 50—60% на сите 250 μ), имеющего рабочую влажность 3—4%, надежно реализуется при условии, что топливо предварительно нагрето до температуры 700°C.

Изучение условий воспламенения топлива в «закрытом» факеле производилось в топке с насадкой и без насадки. В результате сравнительных исследований, проводившихся на мелкозернистом торфяном полукоксе (при $(Q/R)^{в*} = 2—3$ млн. ккал/м²час, температуре предварительного подогрева топлива $t_{топ} = 900—950^\circ\text{C}$, температуре вторичного воздуха $t_{втор} = 100—150^\circ\text{C}$, поступавшего в топку с начальной скоростью $w_{втор} = 20$ м/сек и коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1,1—1,15$) было выяснено, что накаливаемый слой огнеупора оказывал существенное влияние на температурный режим потока, в результате чего температура факела на расстоянии 700 мм от дутьевого сопла достигала 1400—1450°C.

При отсутствии насадки после воспламенения факела температура его быстро снижалась и на расстоянии 700 мм от дутьевого сопла эта температура была всего около 750°C.

При работе топки с насадкой на различных режимах и с разными видами твердого топлива также проявилась положительная роль слоевой насадки в процессе воспламенения факела.

Процесс воспламенения во второй ступени установки топлива с большим выходом летучих веществ заметно отличался от процесса воспламенения топлива с малым выходом летучих веществ.

Так, при сжигании накаливаемого топлива с большим выходом летучих веществ: торфа ($w^p = 10—30\%$), бурого угля ($w^p = 20\%$) и сланца ($w^p = 0,5—2\%$), а также пылевидного торфяного полукокса ($w^p = 5—8\%$) — топлива с малым выходом летучих веществ, но высокореакционноспособного, во всех исследованных случаях [$(Q/R)^в$ от 2 до 20 млн. ккал/м²час; t топлива от 500°C до 1050°C; $t_{втор}$ от 50 до 350°C; $w_{втор}$ от 10 до 55 м/сек и α от 0,9 до 1,6] наблюдалось устойчивое воспламенение факела.

Температурный уровень, замеренный в факеле, зависел, при этом, от температуры предварительного нагрева топлива и скорости вылета воздушной струи.

$w_{втор}$ оказывала особенно существенное влияние на разви-

* $(Q/R)^в$ отнесены к фронтальному сечению топки с насадкой, т. е. сечению, расположенному на расстоянии 700 мм от устья дутьевого сопла.

тие температурного уровня при низких температурах предварительного нагрева топлива ($t_{\text{топ}} = 500\text{--}600^\circ\text{C}$). При возрастании $t_{\text{топ}}$ влияние $w_{\text{втор}}$ на развитие температурного уровня постепенно уменьшалось.

Режимы замедленного воспламенения факела наблюдались в опытах лишь для топлива с малым выходом летучих веществ при низких значениях $w_{\text{втор}}$.

Режимы устойчивого воспламенения ($\alpha = 1,1\text{--}1,2$) мелкозернистого торфяного полукокса ($w^p = 4\text{--}12\%$) наблюдались при температуре предварительного подогрева топлива до 700°C и воздуха до 100°C . Эти режимы были отмечены также (по единичным замерам) и при работе на холодном воздухе.

При работе на мелкозернистом антраците ($w^p = 2\%$) режимы устойчивого воспламенения обеспечивались лишь при условии подогрева топлива до 900°C и воздуха до 250°C . Режимы устойчивого воспламенения факела для топлива с малым выходом летучих веществ наблюдались во всех случаях при $w_{\text{втор}}$: для мелкозернистого торфяного полукокса ≥ 23 м/сек (от 23 до 55 м/сек); для мелкозернистого антрацита ≥ 30 м/сек (от 30 до 33 м/сек). (Основные параметры, характеризующие работу установки, изменялись при этом в следующих пределах: $(Q/R)^b$ от 2 до 13 млн. ккал/м²час; $t_{\text{топ}}$ от 700 до 1150°C ; $t_{\text{втор}}$ от 50°C до 300°C ; $w_{\text{втор}}$ от 10 до 55 м/сек и α от 0,6 до 1,5).

Такое существенное влияние $w_{\text{втор}}$ на развитие температурного уровня связано в первую очередь, по-видимому, с рециркуляцией топочных газов из зоны высоких температур к корню факела.

Кроме того, с ростом скорости вылета воздушной струи, скорость потока относительно частиц в начальный момент увеличивается, в результате чего создаются повышенные местные концентрации топлива и повышенные скорости горения, что также должно было способствовать увеличению температурного уровня в факеле.

При работе на режимах устойчивого воспламенения температура факела перед фронтом насадки достигала $1150\text{--}1500^\circ\text{C}$. В случае, если в начальный момент времени воспламенение газовзвеси торфяного полукокса было замедленно, то по мере приближения потока к насадке сгорание газовзвеси ускорялось и температура факела перед фронтом насадки достигала также $1150\text{--}1500^\circ\text{C}$, а для антрацита эта температура составляла $800\text{--}1200^\circ\text{C}$.

Таким образом, проведенные сравнительные исследования (с насадкой и без нее) выявили положительную роль слоевой

огнеупорной насадки в процессе воспламенения топлива, предварительно нагретого (и частично газифицированного) в топке-нагревателе.

Влияние насадки на ход процесса воспламенения в зоне топки перед насадкой было связано, по-видимому, с тепловым воздействием раскаленного слоя огнеупора (стабилизирующего зону высоких температур на незначительной удалении от места ввода топливной смеси) как за счет лучеиспускания, так и за счет конвективного переноса горячих газов (в зоне рециркуляции) к корню факела.

Для всех исследованных видов топлива режимы наиболее интенсивного развития температурного уровня в факеле были получены при $w_{\text{втор}} > 30$ м/сек.

Осуществление режимов устойчивого воспламенения топлива позволило достигнуть высокой тепловой форсировки факела $(Q/R)^b = 20$ млн. ккал/м²час.

Исследование условий сгорания топлива

а) Опыты на торфяном полукоксе

Испытания экспериментального топочного устройства с насадкой осуществлялись в основной своей части на мелкозернистом 0—5 мм (полный остаток 50—60% на сите 250 м) полукоксе фрезерного торфа, выдаваемом из кипящего слоя. Средний состав исходного торфяного полукокса по данным технического анализа: $w^p = 4\text{--}12\%$; $A^c = 11\text{--}16\%$; $V^r = 11\text{--}13\%$.

Температура плавления золы полукокса:

$$t_1 = 1130^\circ\text{C}; t_2 = 1190^\circ\text{C}; t_3 = 1280^\circ\text{C}.$$

Сравнительные исследования процесса сгорания в топке с насадкой и без насадки

Газообразование и расход кислорода по ходу потока в топке с насадкой ($H_{\text{нас}} = 400$ мм; $d_{\text{нас}} = 60\text{--}65$ мм) показывают, что установка насадки резко изменяет ход процесса сгорания в объеме топки перед насадкой, а также в той части, где установлена насадка. Соответственно этому изменяются также показатели процесса горения в сечении топки, расположенном на выходе газов из насадки. (Опыты проводились при: $(Q/R)^b = 2\text{--}3 \cdot 10^6$ ккал/м²час; $\alpha = 1,1\text{--}1,15$; $t_{\text{втор}} = 100\text{--}150^\circ\text{C}$).

Если в условиях испытанной установки состав газа в выходном сечении насадки соответствовал составу продуктов

полного сгорания топлива, то в случае отсутствия насадки газ в этом сечении характеризовался содержанием еще около 13% кислорода, а содержание RO_2 едва достигало 7%.

Температура факела в насадке достигала $1500^\circ C$ т. е. превышала приблизительно в 2 раза температуру, достигнутую в том же сечении при работе без насадки.

При отсутствии насадки потери тепла q_1 составляли 30% при суммарных потерях $(q_3 + q_4) = 40\%$. При установке насадки потери $q_4 = 1\%$, а q_3 практически отсутствовали. Улавливание золы в жидком виде в топке с насадкой достигало 97%.

Таким образом, сравнительные опыты показали весьма положительную роль огнеупорной насадки как эффективного устройства для интенсификации процесса горения.

Работа установки при различных форсировках

При форсировке тепловых нагрузок были достигнуты видимые тепловые напряжения насадки ($H_{нас} = 400$ мм; $d_{нас} = 60-65$ мм) порядка 13 млн. ккал/м²час (или соответственно 13 млн. ккал/м³час). Максимальная температура, замеренная в слое, при форсировке от 2 до 13 млн. ккал/м²час изменялась в среднем от $1500^\circ C$ до $1700^\circ C$, что обеспечивало возможность широкого изменения нагрузки топki без нарушения устойчивого режима шлакоудаления.

С повышением тепловой нагрузки (от 2 до 13 млн. ккал/м²час) доля топлива, сгорающего по тракту двухступенчатой топki до насадки, уменьшалась с 90 до 60%. Соответственно этому увеличивалась доля топлива, сгорающего в зоне насадки. Состав продуктов сгорания после насадки в процессе форсировки практически не изменялся и соответствовал составу продуктов полного сгорания.

Показатели работы установки по недожогу и уносу оказались в сильной степени зависящими не только от тепловой нагрузки, но и от избытка воздуха ($t_{втор} = 100-200^\circ C$). При $\alpha = 1,2$ потери тепла q_3 практически равнялись нулю во всем исследованном диапазоне тепловых нагрузок; потери тепла q_4 возрастали (при форсировке топki) от 1 до 4-5%, а улавливание золы в пределах топочной камеры при этом уменьшалось от 99 до 93%.

Существенно отметить, что гидравлическое сопротивление слоя оказалось в процессе форсировки весьма умеренным (изменялось от 5 до 100 мм вод. столба при давлении воздуха в магистрали перед второй ступенью топki от 50 до 200 мм. вод.

столба). С этой точки зрения резервы дальнейшего повышения теплонапряжения слоя далеко еще не исчерпаны.

Влияние размера кусков и высоты насадки на процесс сгорания

Влияние размера кусков насадки на процесс сгорания исследовалось при постоянной высоте насадки ($= 400$ мм). Рассмотрение экспериментальных кривых показывает, что показатели процесса сгорания по недожогу и уносу зависят от размера кусков насадки и коэффициента избытка воздуха [$(Q/R)^B = 5 \cdot 10^6$ ккал/м²час; $t_{втор} = 100-200^\circ C$].

При $\alpha = 1,2$ потери тепла q_3 практически отсутствовали; потери тепла q_4 уменьшались (при уменьшении $d_{нас}$ с 60-65 мм до 50-55 мм) с 3-4 до 1%; $a_{шл}$ возрастал с 97 до 98,5%. Дальнейшее уменьшение размера кусков насадки ($\alpha = 1,2$) с 50-55 мм до 40-45 мм практически не сказывалось на величинах q_4 и $a_{шл}$. Сопротивление насадки при уменьшении $d_{нас}$ с 60-65 мм до 50-55 мм увеличивалось от 5 до 10 мм. вод. столба, а при уменьшении кусков до 40-45 мм сопротивление слоя возрастало до 50-60 мм. вод. столба.

Таким образом, для данной установки при работе на мелкозернистом торфяном полукоксе оптимальным размером кусковой насадки следует считать $d_{нас} = 50$ мм (при $H_{нас} = 400$ мм).

Влияние высоты насадки на процесс сгорания проверялось при неизменном размере кусков насадки ($= 50-55$ мм) и изменении высоты слоя (от 200 до 500 мм; число рядов насадки от 4 до 10) за счет досыпки кусков огнеупора при неизменном положении опорной водоохлаждаемой решетки. В этом случае общий объем топki второй ступени не изменялся, однако, объем от дутьевого сопла до насадки при увеличении высоты слоя постепенно сокращался. Последнее обстоятельство могло изменить условия сгорания топлива в объеме перед слоем насадки и отразиться на суммарных показателях работы топочного устройства.

Опыты проводились при $(Q/R)^B = 5 \cdot 10^6$ ккал/м²час; $t_{втор} = 100-200^\circ C$; $\alpha = 1,2$. Повышенные потери вследствие механического недожога и уноса золы, наблюдавшиеся при $H_{нас} = 200$ мм, уменьшались с увеличением высоты слоя и при $H_{нас} = 400$ мм достигали величины: $q_4 = 1\%$; $(100 - a_{шл}) = 1,5\%$.

Потери же тепла q_3 (при $\alpha = 1,1 \div 1,2$) практически отсутствовали при $H_{\text{нас}} \geq 300$ мм.

Увеличение высоты слоя до 500 мм не привело, однако, к дальнейшему сокращению q_4 и $(100 - a_{\text{шл}})$. Такой результат мог быть объяснен значительным сокращением полезного объема топки второй ступени, заполненного кусками насадки.

Таким образом, для мелкозернистого торфяного полукокса $H_{\text{нас}} = 400$ мм ($\frac{H_{\text{нас}}}{d_{\text{нас}}} = 8$ рядам) является для данной установки оптимальной. По-видимому, для каждого вида твердого топлива также может быть подобран свой оптимальный размер кусков насадки и высота ее засыпки.

Работа установки на пылевых фракциях

Опыты проводились на пылевидном торфяном полукоксе (размер частиц 0—2 мм; полный остаток 10—15% на сите 250 μ).

Средний состав исходного полукокса по данным технического анализа: $w^p = 4-8\%$; $A^c = 11-16\%$; $V^r = 6-10\%$.

Температура плавления золы топлива:
 $t_1 = 1230^\circ\text{C}$; $t_2 = 1290^\circ\text{C}$; $t_3 = 1425^\circ\text{C}$.

Для сравнения с показателями, полученными в процессе форсирования тепловых режимов на мелкозернистом топливе, эти исследования проводились при тех же размерах насадки, т. е. $d_{\text{нас}} = 60-65$ мм, $H_{\text{нас}} = 400$ мм.

Проведенные исследования подтвердили возможность эффективного сжигания не только мелкозернистого топлива, но и пылевидных фракций твердого топлива в огнеупорной слоевой насадке с жидким шлакоудалением.

Эти показатели также могут быть, по-видимому, значительно повышены при работе с оптимальными размерами насадки.

При изменении тепловой нагрузки от 2 до 20 млн. ккал/м² час доля пылевидного топлива, сгорающего до насадки, снижалась с 85 до 20%, а доля топлива, сгорающего в насадке, увеличивалась от 15 до 65—70%.

При тепловом напряжении ≥ 15 млн. ккал/м² час наблюдалось возрастание механического недожога и уноса, что объясняется, по-видимому, увеличением скорости потока при недостаточной высоте слоя насадки, что ведет к смещению процесса горения в нижние слои насадки. Сопротивление насадки во всех случаях не превосходило 50 мм вод. столба.

На основании полученных результатов опыты были продолжены в направлении исследования возможности применения огнеупорной насадки для интенсивного сжигания различных видов мелкозернистого и пылевидного топлива.

б). Опыты на фрезерном торфе

Опыты проводились при $d_{\text{нас}} = 50-55$ мм и изменении $H_{\text{нас}}$ от 300 до 500 мм; $t_{\text{топ}} = 800-1000^\circ\text{C}$, $t_{\text{втор}} = 100-250^\circ\text{C}$.

В опытах использовался мелкозернистый торф 0—13 мм (полный остаток 70% на сите 250 μ ; $w^p = 10-30\%$; $A^c = 16,5\%$) и торф 0—5 мм с повышенным содержанием пылевых фракций (полный остаток 45% на сите 250 μ ; $w^p = 5-8\%$; $A^c = 6\%$).

Температура плавления золы мелкозернистого торфа: $t_1 = 1015^\circ\text{C}$; $t_2 = 1030^\circ\text{C}$; $t_3 = 1045^\circ\text{C}$ и пылевидного торфа: $t_1 = 1130^\circ\text{C}$; $t_2 = 1160^\circ\text{C}$ и $t_3 = 1190^\circ\text{C}$.

Опыты показали, что процесс сгорания торфа в двухступенчатой топке с огнеупорной слоевой насадкой весьма устойчив и осуществляется с жидким шлакоудалением.

Доля пылевидного торфа, поступавшего в насадку, при изменении тепловой нагрузки от 3 до 8 млн. ккал/м² час возрастала от 15 до 35%. При работе на мелкозернистом торфе с тепловой нагрузкой 3—4 млн. ккал/м² час и изменении w^p с 10% до 20% доля несгоревшего топлива, поступавшего в насадку, увеличивалась приблизительно в 2 раза, т. е. с 15—20% до 35—40%.

При $H_{\text{нас}} \geq 400$ мм потери тепла q_4 не превышали 0,5%; q_3 практически отсутствовали при $\alpha \geq 1,2$ и тепловой нагрузке топки с насадкой до 4 млн. ккал/м² час.

При сжигании пылевидного торфа с тепловой нагрузкой свыше 4 млн. ккал/м² час q_3 выросли до 3—4%.

Суммарный процент улавливания золы в шлаковой ванне достигал 99, в том числе в жидком виде 88—90. При непрерывной работе установки на торфе до 5 часов сопротивление насадки было в пределах 10—50 мм вод. столба. Зашлаковывания или разъедания шамотной насадки не наблюдалось.

в) Опыты на подмосковном буром угле

Опыты проводились при $d_{\text{нас}} = 50-55$ мм, $H_{\text{нас}} = 400$ мм; $t_{\text{топ}} = 850^\circ\text{C}$, $t_{\text{втор}} = 250-300^\circ\text{C}$.

В опытах использовался бурый уголь 0—5 мм (полный

остаток 75% на сите 250 μ) с влажностью $w^p = 20\%$ и зольностью $A^c = 30\%$. Температура плавления золы угля: $t_1 = 1390^\circ\text{C}$; $t_2 = 1400^\circ\text{C}$ и $t_3 = 1425^\circ\text{C}$.

При тепловом напряжении 3—4 млн. ккал/м² час и избытке воздуха $\alpha = 1,05$ —1,15 в насадке сгорало 40—45% топлива, причем потери тепла q_3 были менее 1%, а потери тепла q_4 до 1,5%.

Улавливание золы в шлаковой ванне до 99%, в том числе в жидком виде 86—94%.

В опытах продолжительностью до 4-х часов непрерывной работы сопротивление насадки при нормальном режиме было в пределах 100—200 мм вод. ст. Однако, вследствие относительно больших потерь тепла в малой установке через охлаждаемые водой стенки топки в опытах с бурым углем, характеризующимся высокой температурой плавления золы, имели место отклонения от нормального режима, связанные с частичным застыванием шлака вблизи от охлаждаемых водой стенок топки и повышением, в результате этого, сопротивления насадки. Видимого разъедания шамотной насадки шлаками бурого угля при этом не наблюдалось.

г) Опыты на эстонском сланце

При работе со сланцами исследовалась лишь возможность осуществления интенсивного процесса сжигания в топке с огнеупорной насадкой, работающей с жидким шлакоудалением, поэтому огнеупорный материал специально не подбирался и использовалась насадка ($d_{\text{нас}} = 50$ —55 мм; $H_{\text{нас}} = 300$ мм), выполненная из боя шамотного кирпича, обладающего сравнительно невысокой стойкостью к воздействию основных шлаков.

Исследование проводилось на подсушенном ($w^p = 0,5$ —2%) мелкозернистом 0—6 мм (полный остаток 80% на сите 250 μ) и пылевидном 0—3 мм (полный остаток 10% на сите 250 μ) сланце. Зольность сланцев $A^c = 45,5\%$. Содержание углекислоты карбонатов в пересчете на сухую массу мелкозернистого топлива $\text{CO}_2 = 15\%$ и пылевидного топлива = 17%.

Температура плавления золы мелкозернистого сланца: $t_1 = 1200^\circ\text{C}$; $t_2 = 1205^\circ\text{C}$; $t_3 = 1210^\circ\text{C}$; и пылевидного сланца: $t_1 = 1280^\circ\text{C}$; $t_2 = 1290^\circ\text{C}$; $t_3 = 1300^\circ\text{C}$.

Температура предварительного нагрева топлива от 500 до 900 $^\circ\text{C}$, вторичного воздуха в пределах 150—250 $^\circ\text{C}$.

Во всем диапазоне избытков воздуха α от 1,1 до 1,6 наблю-

дался устойчивый процесс горения сланца с жидким шлакоудалением.

При тепловом напряжении 4—5 млн. ккал/м² час и $\alpha = 1,2$ на долю пылевидного сланца, сгоравшего в насадке, приходилось всего около 5%. При работе на мелкозернистом сланце и увеличении тепловой нагрузки до 7—8 млн. ккал/м² час эта доля увеличивалась до 30—40%.

Потери тепла q_3 при $\alpha \geq 1,2$ практически отсутствовали; потери тепла q_4 не превышали 0,5%. Улавливание золы в жидком виде до 99%.

Как и следовало ожидать, наблюдалось повышенное разъедание материала насадки сланцевыми шлаками. При непрерывной работе на сланце до 6 часов сопротивление насадки было в пределах 10—50 мм вод. столба.

В последующих опытах исследовалась работа насадки, выполняемой из различных огнеупорных материалов. Эти исследования продолжаются.

д) Опыты на донецком антраците

Насадка: $d_{\text{нас}} = 60$ —65 мм, 50—55 мм и 40—45 мм; $H_{\text{нас}} = 400$ мм.

Опыты проводились с мелкозернистым 0—5 мм (полный остаток 90% на сите 250 μ ; $A^c = 21$ —26%) и пылевидным ($R_{0-15 \text{ мм}} = 100\%$; $A^c = 12,5\%$) антрацитом.

Содержание влаги в рабочем топливе = 2%. Температура плавления золы мелкозернистого антрацита: $t_1 = 1240^\circ\text{C}$; $t_2 = 1300^\circ\text{C}$; $t_3 = 1330^\circ\text{C}$ и пылевидного антрацита: $t_1 = 1270^\circ\text{C}$; $t_2 = 1290^\circ\text{C}$; $t_3 = 1350^\circ\text{C}$.

За счет частичного сгорания антрацита в топке с кипящим слоем, на выходе из нее поддерживалась температура 900—1000 $^\circ\text{C}$. Далее, по тракту между I-ой и II-ой ступенями осуществлялась рассредоточенная подводка горячего воздуха (150—250 $^\circ\text{C}$), что приводило к дальнейшему сгоранию части антрацита. Таким путем компенсировались потери тепла по тракту и температура перед II-й ступенью поддерживалась на уровне 950—1000 $^\circ\text{C}$. При тепловом напряжении топки с насадкой от 2 до 5,5 млн. ккал/м² час и избытке воздуха $\alpha = 1,2$ потери тепла q_3 отсутствовали; потери тепла q_4 составляли 2—6%.

Улавливание золы в жидком виде достигало 96—97%. Унос золы с дымовыми газами практически отсутствовал. На этих режимах в насадку поступало от 40 до 50% топлива.

В опытах на антраците продолжительностью до 4 часов со-

170659

противление насадки (на нормальном режиме) не превышало 100 мм вод. столба.

Для решения задачи эффективного сжигания антрацита в топке с огнеупорной насадкой необходимо установить оптимальные размеры насадки и проверить стойкость материала насадки, что может быть осуществлено лишь на более крупной установке, в условиях длительной работы.

Результаты испытаний одноступенчатой установки

1) Исследование условий воспламенения и сгорания топлива в топке с наклонным расположением слоевой насадки

Были проведены опыты по сжиганию топлива с высоким выходом летучих веществ: мелкозернистого торфа, сланца и бурого угля, а также топлива с малым выходом летучих веществ, но высокой реакционной способностью — пылевидного торфяного полукокса — непосредственно в топке с огнеупорной насадкой ($H_{\text{нас}} = 300$ и 400 мм; $d_{\text{нас}} = 50—55$ и $60—65$ мм).

Топливо, с рабочей влажностью: мелкозернистый торф — 12—18%, бурый уголь — 12%, мелкозернистый и пылевидный сланец — 1% и пылевидный торфяной полукокс — 5%, подавалось в I-ую ступень, которая не разжигалась и использовалась лишь как питатель топки II-ой ступени.

Под решетку I-й ступени поступал первичный воздух с температурой от 15 до 300°C.

Перед топкой с насадкой температура вторичного воздуха в опытах составляла: на торфе 150—240°C, на буром угле 300—350°C, на сланцах 100—200°C и на торфяном полукоксе 50°C.

Температурный уровень в факеле (после смешения топлива с воздухом) наиболее интенсивно развивался при сжигании сланца и торфяного полукокса $[(Q/R)^{\text{в}} = 5—11$ млн. ккал/м²час; $w_{\text{втор}} = 25—40$ м/сек и $\alpha = 0,9—1,5$].

Воспламенение торфа и бурого угля происходило замедленно, однако, во всех случаях при работе без разжига первой ступени в огнеупорной насадке развивались температуры, превышающие температуру жидкоплавкого состояния золы исходного топлива.

Сжигание топлива осуществлялось с видимыми тепловыми напряжениями топки в пересчете на фронтное сечение на-

садки в среднем от 4 до 10 млн. ккал/м²час (максимум 20 млн. ккал/м²час).

Потери тепла q_4 оставались примерно на том же уровне, как и при работе по двухступенчатой схеме; потери тепла q_3 несколько возрастали.

Положительные результаты, полученные в этих опытах, позволили перейти к исследованию процесса воспламенения и сгорания топлива в одноступенчатой установке с горизонтальным расположением слоевой насадки.

2) Исследование условий воспламенения и сгорания топлива в топке с горизонтальным расположением слоевой насадки

Опыты проводились в основном на фрезерном торфе с $w^{\text{в}}$ от 10 до 30% при $H_{\text{нас}} = 400—500$ мм и $d_{\text{нас}} = 55—70$ мм.

Проведенные исследования с различными вариантами топочного тоннеля (перед насадкой) показали, что режимы устойчивого воспламенения и сгорания торфа наиболее эффективно реализуются при работе с топочным тоннелем, имеющим соотношением диаметров тоннеля топочной камеры D и смесительной головки (форкамеры) d около 2,5.

Минимальная температура дутьевого воздуха, обеспечивающая устойчивое воспламенение торфа ($\alpha = 1,1—1,2$) в одноступенчатой топке с горизонтальным расположением слоевой огнеупорной насадки составляла:

для торфа с $w^{\text{в}} = 10\%$	—	t воздуха = 200°C;
»	20%	» 300°C;
»	30%	» 400°C.

Первичный воздух подавался в топку в количестве 15—45% от суммарного.

$(Q/R)^{\text{в}}$ изменялось в пределах от 135 до 320 тыс. ккал/час.

Явления срыва факела происходили в основном при увеличении α свыше 1,5—1,6. Однако срывные режимы были отмечены также и при меньших значениях α , то есть в тех случаях, когда температура дутьевого воздуха была ниже предельной.

Режимы устойчивого воспламенения факела реализовались не только за счет подогрева воздуха, но также и за счет соответствующей подготовки аэровзвеси.

Представляется целесообразным увеличение качества первичного воздуха, вводимого в смеси с топливом, при одновременном улучшении степени перемешивания топлива и воздуха.

При сжигании торфа при $(Q/R)^0$ до 5 млн. ккал/м²час и избытке воздуха $\geq 1,2$ потери тепла с q_3 в большинстве опытов практически отсутствовали. При тепловом напряжении свыше 5 млн. ккал/м²час эти потери в 1,5 раза превышали q_3 , полученные при работе по двухступенчатой схеме.

Показатели потерь тепла с q_4 были приблизительно равны таковым при работе на двухступенчатой установке.

Таким образом, при обеспечении соответствующего подогрева воздуха одноступенчатый процесс может быть применен для топлива со значительной влажностью.

Выяснение основных закономерностей процесса горения потока твердого топлива в слоевой огнеупорной насадке

Анализ основных особенностей процесса горения потока твердого топлива в слое-насадке показал, что задача расчета этого процесса может быть значительно упрощена (по сравнению со сжиганием обычного слоя топлива) и сведена к рассмотрению только закономерности расходования кислорода.

Режим горения в насадке на установившемся режиме всегда соответствует т. н. диффузионному режиму горения, причем концентрация частиц принимает некоторое постоянное значение для каждого сечения слоя, изменяющееся, однако, по его длине.

По методике расчета, предложенной Л. Н. Хитриным, расчет процесса горения в огнеупорной насадке может быть произведен следующим образом. Для упрощения предположено, что горение в слое происходит главным образом на поверхности кускового материала, или в непосредственной близости от нее, а обычное объемное горение потока по интенсивности относительно мало. Если принять простейший закон осаждения частиц в слое-насадке, то это, естественно, дает соответствующий приближенный характер конечных закономерностей, но ценность их, по-видимому, заключается в том, что они выявляют основные качественные особенности нового явления.

В этом случае можно написать следующие два усредненных уравнения:

Для расходования кислорода вдоль потока:

$$-\frac{dO_2}{dx} = \frac{k^*}{w} \cdot S_i \cdot N \cdot O_2, \quad (2)$$

где O_2 — концентрация кислорода в потоке, (г/см³);
 k^* — коэффициент реакционного газообмена для слоя, (см/сек);

S_i — удельная поверхность кускового слоя, $\left(\frac{\text{см}^2}{\text{см}^3}\right)$

w — скорость потока, (см/сек);

N — доля покрытия кусков насадки углеродом;

— для изменения содержания твердой фазы вдоль потока:

$$-\frac{dC}{dx} = \frac{\mu S_i}{w} (1-N) \cdot C, \quad (3)$$

где C — концентрация твердой фазы в потоке, (г/см³);

μ — константа переноса твердой фазы к стенке, (см/сек);

При установившемся процессе должно соблюдаться условие: все что поступает на стенку — сгорает.

Уравнение расходования кислорода в окончательном виде получается из совместного решения уравнений (2) и (3):

$$-\frac{dO_2}{dx} = \frac{k^*}{w} S_i \frac{\mu(O_2 - O_{2\text{изб}})}{k^*O_2 + \mu(O_2 - O_{2\text{изб}})} \cdot O_2 \quad (4)$$

Решение уравнения (4):

$$\left(\frac{O_2 - O_{2\text{изб}}}{O_2^{\text{н}} - O_{2\text{изб}}}\right)^{\frac{k^*}{\mu}} \cdot \frac{O_2}{O_2^{\text{н}}} = e^{-\frac{k^* S_i}{w} x}, \quad (5)$$

$O_2^{\text{н}}$ — начальная концентрация кислорода на входе потока в насадку, (г/см³);

$O_{2\text{изб}}$ — избыточная концентрация кислорода (по сравнению с теоретически необходимой), (г/см³).

Уравнение (5), описывающее процесс горения в насадке, отличается от соотношения для горения в обычном угольном слое, данного А. С. Предводителевым, множителем

$\left(\frac{O_2 - O_{2\text{изб}}}{O_2^{\text{н}} - O_{2\text{изб}}}\right)^{\frac{k^*}{\mu}}$. Степень его влияния зависит от вели-

чины $a = \frac{k^*}{\mu}$. Для слоя k^* приблизительно равен β (константе диффузии), т. е. величина a практически равна $\frac{\beta}{\mu}$ (отношению коэффициентов переноса на стенку газообразного и твердого компонентов смеси).

В результате обработки опытных данных по уравнению (5) получены следующие значения величин a : для фрезерного торфа 2,8; для торфяного полукокса пылевидного 1,5 и для мелкозернистого 1,2.

Эти величины находятся в качественном соответствии с видом сжигаемого топлива и режимом горения, причем интенсивности переноса газовой и твердой фаз имеют одинаковый порядок. Значения приведенной длины зоны горения $\frac{L}{d_{нас}}$ для различных концентраций кислорода на входе в насадку находятся из графика, построенного в зависимости от основного параметра процесса $\frac{\beta}{\mu}$ и могут быть использованы для практических расчетов.

Для дальнейших расчетов процесса горения распыленного твердого топлива в насадках необходимо экспериментальное определение величины a , являющейся функцией размера кусков насадки, скорости фильтрации, размера частиц и сорта топлива.

Приведенный в работе анализ и система расчета могут быть распространены и на другие случаи организации процесса горения в насадке, выполняемой в виде стержневого или трубного пучка.

ВЫВОДЫ

1. Экспериментальная проверка нового метода сжигания потока твердого топлива в криволинейных каналах с применением огнеупорной насадки подтвердила его принципиальную осуществимость и эффективность. Процесс осуществляется в широком диапазоне изменения тепловых нагрузок при хорошей полноте сгорания и жидком шлакоудалении.

2. Топливо с различным выходом летучих веществ и различной реакционной способностью — торф, бурый уголь, сланец, торфяной полукокс, антрацит можно сжигать в двухступенчатой топке.

3. Топливо с высоким выходом летучих веществ — торф, сланец, бурый уголь, а также топливо с малым выходом летучих веществ, но с высокой реакционной способностью — пылевидный торфяной полукокс — можно сжигать в одноступенчатой топке с показателями, близкими к показателям работы установки по двухступенчатой схеме.

4. Произведенный анализ основных особенностей процесса горения потока топлива в слое-насадке показал, что расчет

этого процесса может быть сведен только к рассмотрению уравнения расходования кислорода:

$$\left(\frac{O_2 - O_{2,изб}}{O_{2,н} - O_{2,изб}} \right)^{\frac{k^*}{\mu}} \frac{O_2}{O_{2,н}} = e^{-\frac{k^* S_i}{w} x}$$

В опытах на фрезерном торфе и его полукоксе найдено, что интенсивности переноса газовой (β) и твердой (μ) фаз имеют одинаковый порядок величин. Практическая длина зоны горения может быть определена из зависимости: $\frac{L}{d_{нас}} = f\left(\frac{\beta}{\mu}\right)$.

5. В настоящее время при консультации лаборатории интенсификации топочных процессов ЭНИН'а АН СССР разработаны опытно-промышленные установки с огнеупорными насадками для сжигания фрезерного торфа и антрацита.

Результаты основных разделов диссертации опубликованы в статьях:

1. Л. Н. Хитрин, В. Г. Ветров. «Метод интенсивного сжигания распыленного твердого топлива с жидким шлакоудалением с помощью слоевой огнеупорной насадки». Информационное письмо № 1, ЭНИН АН СССР, М., 1956 г.

2. В. Г. Ветров. «Метод интенсивного сжигания распыленного твердого топлива с жидким шлакоудалением с помощью слоевой огнеупорной насадки». Тезисы докладов на Первом Всесоюзном совещании по комплексному энерготехнологическому использованию топлива, 2-я секция совещания: «Разработка промышленных установок энерготехнологического использования топлива», М., 1956 г.

3. Ю. П. Шелестин, В. Г. Ветров. «Двухступенчатые высокоскоростные топки». Сборник «Проблемы энергетики». Изд. АН СССР, М., 1959 г.

4. М. Б. Равич, В. Г. Ветров. «Исследование эффективности применения огнеупорной слоевой насадки для интенсивного сжигания различных видов мелкозернистого и пылевидного топлива с жидким шлакоудалением». Информационное письмо № 5, ЭНИН АН СССР, М., 1959 г.

5. В. Г. Ветров. «Метод интенсивного сжигания твердого топлива с помощью огнеупорной насадки». Теплоэнергетика, № 1, 1960 г.

Л-32064 от 26/VIII 1960 г.

Зак. 843

Тираж 200

Типография Хлебоиздата, Москва, Шелепиха, 4-я ул., д. 1а