718758
НА ДОМ НЕ ВЫДАЕТСЯ

Министерство высшего образования СССР

Московское
ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище имени Баумана

На правах рукописи

В. И. Хвостов

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ТОПОЧНОГО ПРОЦЕССА В ЦИКЛОННОЙ КАМЕРЕ ПРИ СЖИГАНИИ ЖИДКОГО ТОПЛИВА

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
Заслуженный деятель науки и техники доктор технических наук, профессор *Г. Ф. Кнорре*

Москва 1959

748758
Хвостов В.И. Исследование

В связи с необходимостью создания котельных агрегатов производительностью 600—1200 и более тонн пара в час для работы в блоке с паровыми турбинами мощностью 150—300—600 Мвт, в последние годы проявляется повышенный интерес к новым методам сжигания топлива, позволяющим устранить ряд трудностей, возникающих при факельном способе сжигания. Одним из наиболее перспективных способов сжигания является циклонный способ, идея которого возникла и частично была осуществлена еще в 30-е годы. В настоящее время этот способ получил широкое распространение за рубежом и начинает находить применение также и в нашей энергетике. Главными особенностями циклонного способа, выгодно отличающими его от факельного, являются: а) скачкообразное увеличение интенсивности процесса сжигания топлива, позволяющее в десятки раз уменьшить объем топочной камеры; б) почти полное улавливание золы топлива в виде расплавленного шлака в пределах самого топочного устройства; в) возможность сжигания не тонкой пыли, а дробленого топлива; г) возможность поочередного сжигания в одной и той же топке, с одинаково высокой интенсивностью, широкой гаммы твердых топлив, а также любых видов жидкого и газообразного топлива. Эти особенности циклонного способа делают его весьма перспективным не только в энергетике, при создании мощных котельных агрегатов, но и в газотурбинной технике, а также в ряде технологических производств (в металлургии, химии).

748758

Практическое применение циклонных топок в энергетике опередило их экспериментальное и теоретическое исследование, и в настоящее время, несмотря на наличие значительного эксплуатационного опыта (в основном, зарубежного) и некоторого экспериментального материала, отсутствует не только теория циклонного топочного процесса, но и полное, законченное, основанное на экспериментальных исследованиях, представление о протекании этого процесса, о его внутренней структуре. Отсутствие таких представлений сдерживает техническое применение циклонных топок и вынуждает эмпири-

ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ
Библиотека

ческим путем, в ходе наладок и доводки, находить оптимальные конструктивные и режимные соотношения в каждом отдельном случае.

Настоящая работа посвящена изучению структуры циклонного процесса и является составной частью общего комплекса исследований, проводившихся на специальных стендах в МВТУ им. Баумана совместно с МО ЦКТИ под руководством проф. Г. Ф. Кнорре и к. т. н. М. А. Наджарова.[1]

I. **В первой** главе диссертации приведены краткие сведения о промышленных циклонных топках различных типов и дан обзор стендовых и экспериментально-теоретических исследований циклонных топок, выполненных как у нас в стране, так и за рубежом. Подробнее освещены результаты стендовых исследований МВТУ — МО ЦКТИ. В выполнении некоторых этапов этих исследований (помимо тех, которые явились основой настоящей работы) принимал непосредственное участие автор диссертации. (Л. 2, 3). **Вторая** глава посвящена изложению аэродинамической структуры циклонного процесса, в основном — по результатам исследований Е. А. Нахапетян, Л. Л. Калишевского и С. И. Исаева. Подробно изложена и проанализирована схема структуры циклонного топочного процесса по Г. Ф. Кнорре. В заключении рассмотрены задачи и методы изучения работы циклонной топки на жидком топливе и сформулированы цели настоящего исследования. **Третья** глава дает описание стенда, аппаратуры и методики измерений. Приводится сетка и параметры опытов, система характеристик и методика обработки опытных данных. В **четвертой** главе показаны первичные результаты исследований и дана общая характеристика этих результатов. В **пятой** главе приводится подробный анализ структуры процесса, полученной в результате исследований, делается сопоставление структуры со схемой Г. Ф. Кнорре и дается уточнение этой схемы. Дается также анализ путей создания рациональной схемы высокофорсированной котельной топки для сжигания жидкого топлива. Основные итоги работы сформулированы в **выводах.**

II. Наибольшее распространение в настоящее время получили горизонтальные циклонные топки для сжигания камен-

---

[1]) Имевшийся к 1958 году теоретический и экспериментальный материал, а также производственный опыт работы с циклонными топками освещен в монографии под ред. Г. Ф. Кнорре и М. А. Наджарова (Л. 1), ряд разделов которой написан автором настоящей диссертации. Основные результаты данной работы опубликованы (Л. 1, 2, 3, 4, 5).

ных углей со сравнительно легкоплавкой золой при жидком шлакоудалении. Для циклонных топочных камер этого типа получено наибольшее количество экспериментального материала и предпринят ряд попыток теоретического анализа процесса. Экспериментальные исследования циклонных топок разделяются на две группы: 1) аэродинамические исследования на однофазных и двухфазных моделях и 2) исследования на действующих огневых моделях, полупромышленных и промышленных топках. Наиболее полные результаты в исследованиях первой группы были получены Е. А. Нахапетян, Л. Л. Калишевским, С. И. Исаевым, Д. Н. Ляховским, Б. П. Устименко, А. С. Ковбасюком. Эти опыты с достаточной подробностью установили закономерности движения воздушного потока в циклонной камере, аэродинамическую структуру и ее изменение под воздействием конструктивных и режимных факторов, а также дали некоторые сведения о поведении частиц твердого топлива в камере при холодных ее продувках. Исследования Л. Л. Калишевского на действующей стендовой циклонной топке позволили установить закономерности «горячей» аэродинамики для камер такого типа. Стендовые исследования второй группы, проводившиеся как у нас, так и за рубежом, были направлены, главным образом, на выявление общих, итоговых характеристик циклонного топочного процесса (оптимального избытка воздуха, потерь от недожога, коэффициента шлакоулавливания, сопротивления камеры и т. п.) и их зависимости от конструкции камеры, режима ее работы, вида топлива и т. д. Внутренняя структура развития процесса горения топлива в циклоне оставалась неисследованной, что не давало возможности связать изменение итоговых характеритик работы топки с изменением режима и конструкции.

Имеющиеся к настоящему времени попытки теоретического анализа циклонного топочного процесса, как за рубежом (Каутиус, Лединегг, Хавеманн), так и у нас (Тонконогий, Басина) касаются, в основном, лишь поведения твердых топливных частиц в камере (перемещение по радиусу и выгорание), причем учитываются закономерности только вращательного движения потока. Ограниченность экспериментального материала, положенного в основу этих теоретических построений, непреодолимые математические трудности при решении сложных систем уравнений, описывающих процесс и вытекающая отсюда необходимость в глубоких упрощениях в значительной степени снижают ценность результатов этих попыток. Как убе-

дительно показал Г. Ф. Кнорре, при анализе процесса горения топлива в циклонной топке недостаточно учитывать только вращательное движение газов, но необходимо исходить также из закономерностей продольного движения газов в объеме камеры. В то время как вращательное движение не отличается большой сложностью и не меняет своего характера в широком диапазоне изменения конструкции и режима камеры, схема продольных (осевых) потоков гораздо более сложна и весьма чувствительна к изменению режимных и конструктивных соотношений. В объеме камеры возникают несколько встречных осевых потоков газа, расположенных на различных расстояниях от оси. Количество, направление и интенсивность этих потоков определяются способом ввода воздуха в топку и степенью закрученности газовоздушного потока. На границах этих потоков, около ориентирных поверхностей нулевых осевых скоростей возможно возникновение зон продольной циркуляции газов и частиц топлива, попадающих в эти зоны. В рассматриваемой схеме циклонного процесса зонам циркуляции принадлежит главная роль в интенсификации наиболее медленной стадии топочного процесса — стадии газификации топлива, а зонам активного смесеобразования на границах встречных потоков — в интенсификации стадии дожигания продуктов газификации. В литературе по циклонным топкам зачастую название циклонных безоговорочно приписывается многим топочным устройствам, обладающим лишь одним из внешних признаков циклонного процесса, а именно — вращением потока газов. На основе анализа схемы в диссертации делается попытка подвести итог различным определениям циклонного процесса и сформулировать основные характерные признаки топочного устройства, которое может быть названо циклонным. Такими признаками, повидимому, нужно считать следующие: 1) Наличие интенсивных циркуляционных зон в объеме топочной камеры. 2) Концентрирование частиц топлива в пределах циркуляционных зон. 3) Удержачие частиц топлива за счет действия центробежного эффекта и сил аэродинамического сопротивления в циркуляционных зонах до полной их газификации. 4) Четкое пространственное разделение двух основных стадий суммарного процесса сжигания топлива — стадии газификации и стадии дожигания — с локализацией каждой из стадий в определенной зоне топочного объема. 5) Плотное заполнение объема топочной камеры активными зонами процесса, без «холостых» и «мертвых» участков. 6) Высокие относительные скорости обтекания частиц топлива в циркуляционных зонах и сильно развитая турбулентность в зонах дожигания на

границах встречных потоков, обеспечивающие высокую интенсивность всего топочного процесса в целом.

Будучи построена на большом экспериментальном материале и наблюдениях за работой промышленных и стендовых топок, эта схема позволяет объяснить многие особенности работы циклонных топочных устройств и является в настоящее время наиболее обоснованной и логически законченной схемой. В то же время, бо́льшая часть выводов, вытекающих из этой схемы, носит чисто качественный характер, т. к. в основу схемы были положены, главным образом, аэродинамические исследования, а непосредственной проверки структуры процесса горения топлива в циклонных топках не производилось. Анализ объема и содержания исследований, необходимых для экспериментального изучения процесса горения топлива в высоконапряженных циклонных топках, проведенный в диссертации показывает чрезвычайную сложность этой задачи. Главная трудность заключается в необходимости совместного и одновременного снятия полей скоростей и давлений газа, концентрации топливных частиц, состава продуктов горения и их температуры во всем объеме топочной камеры в условиях горения, при высоких температурах и скоростях в потоке, чрезвычайно чувствительном к возмущению его измерительной аппаратурой. Проблема осложняется отсутствием надежной, оправдавшей себя методики подобного рода структурных исследований. Поэтому при постановке задачи исследования структуры циклонного топочного процесса было признано целесообразным начальное исследование провести при работе топки на жидком топливе (соляровом масле). Ввиду того, что как схема питания процесса топливом, так и развитие явлений, связанных с воспламенением и сгоранием топлива, существенно отличаются от таковых при работе на твердом топливе, использование жидкого топлива в циклонной камере данного типа рассматривалось лишь как вспомогательное средство, как методический прием для изучения топочного процесса, позволяющий установить не только аэродинамическое, но и тепловое взаимодействие характерных зон процеса межу собой, в условиях, когда аэродинамика газовоздушных потоков изменилась под воздействием тепловыделения в объеме камеры. Как оказалось, при этом возможно не только экспериментально проверить схему развития циклонного топочного процесса, но и распространить некоторые полученные результаты на твердое топливо, учтя особенности его поведения при сжигании в циклонной топке.

Таким образом, основной задачей работы явилось исследование структуры циклонного топочного процесса методами газового анализа при сжигании жидкого топлива. Второй, побочной целью работы была попытка оценить пригодность циклонной камеры данного типа в качестве специализированной топки для сжигания жидкого топлива под паровыми котлами.

III. Исследование структуры производилось на камерах стенда циклонной топки МВТУ — МО ЦКТИ, общая схема которого описана в (Л. 1, 2, 3). Циклонная камера основной серии опытов была выполнена из двухстенных цилиндрических обечаек, охлаждаемых водой и футерованных изнутри шамотной массой, нанесенной на стальные шипы длиной 25 мм. Диаметр камеры в свету 650 мм, длина от передней крышки до задней стенки 680 мм. Передняя крышка — коническая, глубиной 100 мм и углом раскрытия 130°. Выходное сопло, расположенное в центре задней стенки, имело внутренний (выходной) диаметр 218 мм и выступало вглубь камеры на 135 мм. Топливо подавалось в камеру с помощью механической центробежной форсунки, установленной по оси камеры в центре улиточной горелки на передней крышке циклона. Через горелку в камеру подавался первичный воздух. Основное количество воздуха — внешний вторичный воздух — подавалось в камеру через регулируемое с помощью языкового шибера тангенциальное сопло, расположенное в правой верхней четверти окружности камеры, если смотреть со стороны передней стенки циклона. Объем камеры составлял 0,22 м^3, площадь поперечного сечения 0,332 м^2, поверхность стен 2,05 м^2. Продукты горения топлива из циклона поступали в камеру дожигания объемом 0,9 м^3, а затем, охлаждаясь при необходимости с помощью впрыска воды, проходили через трубчатый воздухоподогреватель. Соляровое масло подавалось в форсунку с помощью шестеренчатого насоса под давлением до 2 атм. Для отбора проб газа применялись охлаждаемые водой трубки наружным диаметром 20—18 мм и внутренним 4—6 мм, что обеспечивало удовлетворительную закалку газа и предотвращало искажение состава пробы за счет дожигания в трубке. Трубки вводились в камеру поочередно через боковые гляделки, расположенные на расстояниях 60, 200, 300, 500, 620 и 870 мм от передней крышки (последнее — в камере дожигания, на расстоянии 80 мм от выходного сопла), и через три торцовые гляделки, расположенные на передней крышке, на радиусе 270 мм. Применение изогнутых трубок, устанавливаемых в этих гляделках, позволило отбирать пробы газа на любом радиусе в четырех продольных сечениях по всей длине циклона. Пробы

отбирались в аспираторы емкостью 130—600 см³ и анализировались в лабораторных условиях либо на содержание CO_2 и O_2, либо на содержание CO_2, O_2, CO, H_2 и CH_4 на приборах с раздельным дожиганием типа ЦКТИ и «ТОЧИЗМЕРИТЕЛЬ» с точностью определения состава до 0,025—0,05% (абсолютных). Во время опытов замерялся расход топлива, расход и температура первичного и вторичного воздуха, состав газов за камерой дожигания.

Таблица 1

Параметры опытов предварительной серии.

Номер конструктивного варианта	1	1	1	1	2	3	4	5	6
Номер режимного варианта	1	2	3	4	1	1	1	1	1
Диаметр выходного сопла d, *мм*	280	280	280	280	215	190	220	280	280
Длина выходного сопла *l*, *мм*	130	130	130	130	130	130	200	130	130
Смещение сопла вторичного воздуха a_0, *мм*	0	0	0	0	0	0	0	0	110
Ширина сопла вторичного воздуха *a*, *мм*	105	105	105	105	105	105	105	210	105
Высота (открытие) сопла вторичного воздуха h, *мм*	75	50	75	75	75	75	75	41	75
Расход топлива B, *кг/час.*	150	150	150	148	148	150	148	147	150
Температура подогрева воздуха $t_{гв}$, 0°C	250	250	250	250	250	250	250	250	250
Количество первичного воздуха (от общего) l_1, %	20,2	20,4	10,0	19,2	20,2	20,0	20,2	19,6	19,8
Скорость вторичного воздуха w_2, *м/сек.*	93	137	108	84	98	107	97	91	98
Избыток воздуха α	1,10	1,12	1,11	0,95	1,15	1,14	1,16	1,16	1,13

Таблица 2

Параметры опытов основной серии

Наименование варианта	Основной	С изменением a_0	С изменением a_0 и l_1
Обозначение варианта	0—10	260—10	260—20
Смещение сопла вторичного воздуха a_0, *мм*	0	260	260
Расход топлива B, *кг/час*	155	165	154
Форсировка топки $\frac{BQ^н_р}{F_т}$ *ккал/м²час*	$4{,}74 \cdot 10^6$	$5{,}05 \cdot 10^6$	$4{,}71 \cdot 10^6$
Объемное теплонапряжение $\frac{BQ^н_р}{V_т}$, *ккал/м³час*	$7{,}15 \cdot 10^6$	$7{,}61 \cdot 10^6$	$7{,}11 \cdot 10^6$
Температура подогрева воздуха $t_{гв}$, °C	205	205	212
Расход первичного воздуха l_1, %	10	10	20
Скорость вторичного воздуха w_2, *м/сек*	130	130	115
Избыток воздуха α	1,19	1,16	1,18
Количество опытов на данном варианте	2	5	1
Количество точек отбора проб газа	141	159	67
Общее число отобранных проб	141	186	67

Предварительная серия опытов проводилась при изменении режимных и конструктивных параметров в широком диапазоне, но при ограниченном числе точек отбора проб газа (от 15 до 40 в каждом варианте). Параметры опытов этой серии приведены в табл. 1. Основная серия опытов включала в себя три варианта, характеристика которых дана в табл. 2. Большое число точек отбора проб позволило в этом случае выявить подробную структуру процесса.

Первичное представление о структуре дают поля концентраций CO_2, CO, O_2, H_2, CH_4 в объеме камеры. При обработке результатов газового анализа была установлена зависимость

между содержанием CO и H_2 в продуктах сгорания и полной невязкой уравнения горения оказавшаяся линейной в пределах $Z_{полн.} \leqslant 8$:

$$CO = 1{,}15\, Z_{полн.} \tag{1}$$

и

$$H_2 = 0{,}6\,(Z_{полн.} - 1{,}3), \tag{2}$$

где

$$Z_{полн.} = 21 - (1 + \beta)\, CO_2 - O_2, \text{ — невязка}, \tag{3}$$

— воздушный коэффициент топлива. Установление зависимостей (1) и (2) позволило ограничить число подробных анализов газа.

Для анализа структуры использовались обобщенные характеристики, какими являются местный (в данной точке) избыток воздуха, местная полнота тепловыделения и теоретическая (адиабатическая, подсчитанная по составу газа) температура. Для подсчета этих величин использовались выражения (Л. 6):

$$\alpha = \frac{79 + \rho}{100 + \rho} \cdot \frac{21}{21 - O_{2\,ост}} + \frac{21}{100 + \rho}, \tag{4}$$

$$\varphi = 1 - q_{хим\ нед} = 1 - \frac{56{,}7\, \dfrac{C}{CO_2 + CO + CH_4}\,(CO + 0{,}85H_2 + 2{,}8CH_4)}{Q_р^н} \tag{5}$$

и

$$t_{теор} = \frac{\varphi\, Q_р^н + \alpha\, L_0\, (ct)_{гв}}{\Sigma\, vc}, \tag{6}$$

где

ρ — коэффициент, зависящий от состава топлива,

$$O_{2ост} = (O_2 - 0{,}5\,CO - 0{,}5H_2 - 2CH_4)\, \frac{100}{100 - 0{,}5CO - 1{,}5H_2 - 2CH_4}, \tag{7}$$

IV. Первичные результаты исследования структуры были изображены с помощью кривых изменения состава газа и обобщенных характеристик по диаметру камеры в пяти последовательных сечениях и по длине камеры в четырех накрест лежащих продольных сечениях. Эти кривые позволили установить родственность друг другу структур всех трех вариантов основной серии и выявить ряд характерных особенностей структуры, а именно: наличие резко отличающихся по составу газа периферийной и центральной областей, количественную осевую несимметричность в периферийной области, наличие

продуктов неполного горения в приосевой области и т. п. Более четкие и весьма наглядные результаты были получены при построении полей характеристик по методу горизонталей (проведением линий равных значений характеристик). Поля характеристик строились для двух продольных (диаметральных) сечений камеры, расположенных под углом около 80° друг к другу, и для разверток цилиндрических поверхностей на радиусах 320, 280, 240 и 200 мм (периферийная область). Главной внешней особенностью этих полей является разделение объема камеры на две области: внутреннюю (приосевую) и наружную (периферийную). Условной границей между ними можно считать поверхность $\alpha = 1{,}0$. Во внутренней области избыток воздуха падает до 0,7—0,6, но градиенты α сравнительно невелики (порядка 0,003 1/мм) и поле сравнительно ровное и симметричное относительно оси. Наружная область характеризуется избытками до 4—6 и более, причем поле чрезвычайно неравномерное и градиенты избытка достигают значений 0,03—0,01 1/мм. Граница $\alpha = 1{,}0$ у выхода из циклона расположена примерно у окружности выходного сопла, в передней части камеры центральная зона расширена, так что на расстоянии 150—200 мм от передней крышки поверхность $\alpha = 1{,}0$ расположена всего в 40—60 мм от стенки. Непосредственно в пределах конуса передней крышки и на расстоянии 150—200 мм от нее избыток воздуха больше единицы на любом радиусе, а на радиусе 0—50 мм поверхность $\alpha = 1{,}0$ внедряется на глубину 100—150 мм в пределы центральной зоны, так что сама эта зона имеет характерную седлообразную форму. Вследствие несимметричного, одностороннего подвода вторичного воздуха внутренняя область расположена несколько несимметрично относительно оси. Поверхности $\varphi = \text{const}$ примерно совпадают с поверхностями $\alpha = \text{const}$, причем значение $\varphi = 1{,}0$ достигается лишь на поверхности $\alpha = 2$, следовательно, фронт горения не представляет собой геометрической поверхности, а имеет довольно значительную толщину.

Вследствие сравнительно небольшой прямой отдачи циклона (порядка 15% при имевших место умеренных нагрузках) поля теоретической температуры должны достаточно верно соответствовать полям истинной температуры газов. Такое соответствие было подтверждено сопоставлением расчетных теоретических (химических) температур с замеренными по методу двойной термопары. Поля температур имеют более сложную структуру, чем поля α и φ, но характерным является сравнительно ровное поле в центральной области, занимающей бо́ль-

шую часть объема камеры: в пределах области $\alpha \leqslant 1{,}0$ теоретическая температура изменяется от 2100 до 1800° С. В периферийной области температура падает до 600—400° С и ниже.

Поля характеристик, построенные на развертках цилиндрических поверхностей радиусом от 320 до 240 мм, обнаруживают явно выраженный струйный характер развития процесса в периферийной области: воздушная струя, выходящая из сопла, постепенно расширяется как в сторону «пазухи», так и в сторону передней крышки, достигая торцевых стен на протяжении менее чем одного оборота.

V. Для расчета интенсивности работы зон продольной циркуляции и для выявления роли отдельных зон циклонной топочной камеры нами были в дополнение к результатам газового анализа соответствующим образом обработаны данные, полученные при аэродинамических исследованиях (Л. 7). Для оценки мощности продольных потоков газа было использовано выражение:

$$Q = 3600 \int_{R_1}^{R_2} 2\pi r w_x \gamma \, dr, \qquad (8)$$

где:

Q — расход газа (в направлении оси), кг/час,

R_1 и R_2 — границы потока по радиусу, м,

w_x — осевая скорость на текущем радиусе r, м/сек,

γ — удельный вес газа, зависящий от температуры, кг/м³.

Соотношение мощностей осевых потоков для трех вариантов приведено в табл. 3, где мощности выражены в процентах от суммарного расхода газа через камеру. Сопоставление мощностей прямых и обратных потоков в последовательных сечениях камеры обнаруживает рециркуляцию газа из обратного периферийного потока в прямой периферийный (в варианте 0—10) и из прямого центрального в обратный периферийный (в вариантах 260—10 и 260—20), чем подтверждается наличие аэродинамических зон продольной циркуляции, расположенных, соответственно, в «пазухе» и в передней части циклона. Задняя циркуляционная зона (в пазухе) при смещении сопла постепенно вырождается и при смещении 260 мм полностью отсутствует. В противоположность этому, передняя циркуляционная зона, расположенная между передней стенкой и воздушным соплом, получает при этом весьма сильное развитие. Для оценки напряженности продольных циркуляционных зон

вычислялось среднее значение вектора скорости по площади циркуляционной зоны в продольном сечении камеры, по выражению:

$$(\mathrm{rot}\,\overline{w})_{ср} = \frac{\int\limits_F \left[\lim\limits_{S\to 0} \frac{1}{S} \int\limits_C w_x\,dx + w_r\,dr\right] dF}{F}, \qquad (9)$$

где:

$\overline{w} = \overline{w}_x + w_r$ — вектор скорости в плоскости продольного сечения камеры,

F — площадь циркуляционной зоны,

$\int\limits_C w_x\ x + w$ — циркуляция вектора скорости по контуру C, ограничивающему площадку S.

Таблица 3

Материальные балансы зон в последовательных сечениях камеры (в % % от суммарного расхода через камеру).

Характеристика варианта	Расстояние сечения от передней крышки циклона, *мм*	Прямой периферийный поток, %	Обратный периферийный поток, %	Прямой центральный поток, %	Обратный центральный поток, %
Вариант 0—10 B = 155 *кг/час* L_1 = 264 *кг/час* L_2 = 2381 *кг/час* L + B = 2800 *кг/час*	60	82,5	15,0	32,5	нет
	200	72,6	10,4	37,8	нет
	300	72,7	13,9	41,2	нет
	500	71,8	27,5	55,7	нет
Вариант 260—10 B = 165 *кг/час* L_1 = 272 *кг/час* L_2 = 2448 *кг/час* L + B = 2885 *кг/час*	60	нет	43,3	58,4	нет
	200	нет	45,0	60,2	нет
	300	нет	35,2	50,4	нет
	500	27,9	21,1	93,5	0,3
Вариант 260—20 B = 154 *кг/час* L_1 = 522 *кг/час* L_2 = 2088 *кг/час* L + B = 2764 *кг/час*	200	нет	45,2	69,7	нет
	500	27,2	4,5	77,3	нет

В соответствии с этими расчетами, количество газа, вовлекаемого в продольную циркуляцию, составляет: в варианте 0—10 (задняя циркуляционная зона) — 5—10%, в варианте 260—10 (передняя циркуляционная зона) — 10—20%.

Среднее значение вихря продольных циркуляционных зон составляет 460 и 600 1/сек, соответственно. Значение вихря вращательной составляющей скорости в поперечных сечениях камеры равно для рассматриваемых случаев 1070 и 330 1/сек, так что интенсивность продольной циркуляции в первом случае соизмерима, а во втором даже превышает интенсивность вращательного движения газов в камере.

Наличие полей скоростей и подробных полей газового анализа дало возможность проследить за газификацией и выгоранием топлива в различных участках камеры и оценить интенсивность этих процессов в различных зонах. Для определения количества сгоревшего и газифицированного топлива использовались балансные соотношения:

$$\frac{1}{\alpha_{каж}} = \frac{\int_0^{R_п} 2\pi r \,|\, w_x \,|\, \gamma \frac{1}{\alpha} \, dr}{\int_0^{R_п} 2\pi r \,|\, w_x \,|\, \gamma \, dr}, \tag{10}$$

$$\varphi_{каж} = \frac{\int_0^{R_п} 2\pi r \,|\, w_x \,|\, \gamma\varphi \, dr}{\int_0^{R_п} 2\pi r \,|\, w_x \,|\, \gamma \, dr}, \tag{11}$$

$$b_{газ} = \frac{B_{газ}}{B} = \frac{\alpha_{бал}}{\alpha_{каж}}, \tag{12}$$

$$\varphi_{факт} = \varphi_{каж} \cdot b_{газ}, \tag{13}$$

где:

$\alpha_{каж}$ и $\varphi_{каж}$ — средние по сечению кажущиеся (определенные по газовому анализу только на газифицированное топливо) избыток воздуха и полнота тепловыделения,

$b_{газ}$ — доля газифицированного топлива,

$\alpha_{бал}$ — балансовый (по расходу топлива и воздуха) избыток в данном сечении,

$\varphi_{факт}$ — фактическая, с учетом негазифицированного топлива, полнота тепловыделения.

VI. Совместное рассмотрение и анализ полей скорости, избытка, полноты тепловыделения и теоретической температуры дало возможность установить характерные особенности струк-

туры процесса горения жидкого топлива в циклонной камере данного типа, а также дополнить схему горения твердого топлива рядом новых уточненных представлений. Характерной особенностью структуры на жидком топливе, при подводе его по оси камеры, является сосредоточение топлива в центральной области камеры, в основном — в пределах прямого центрального потока. Мелкие, парусные, легко испаряющиеся капли жидкого топлива, слабо подверженные действию центробежного эффекта, оказываются не в состоянии проникнуть в периферийную область. Поскольку основное количество воздуха поступает в периферийные потоки, эта область, при отсутствии в ней топлива, превращается в холостую зону чистого воздуха, способную выполнять лишь вспомогательные функции в топочном процессе. Наиболее медленная стадия топочного процесса, стадия газификации топлива, протекает в прямоточной (центральной) части циклонного потока. Легкая испаряемость применявшегося топлива (соляровое масло), высокий температурный уровень процесса, значительный подогрев воздуха и интенсивная турбулизация потока обеспечивали при имевшем место уровне нагрузок сравнительно быструю газификацию основной массы топлива. При несмещенном воздушном сопле в пределах примерно 1/3 длины камеры газифицировалось до 80—85% топлива. Одако, газификация остальных 20—15% растягивалась до конца камеры и завершалась только в выходном сопле. При смещенном воздушном сопле газификация, начавшаяся в пределах конуса передней крышки, вскоре резко замедлялась вследствие исчерпания окислительной способности среды в передней части камеры. Продолжение газификационного процесса оказывалось возможным лишь за воздушным соплом, когда в центральный поток внедрялся дополнительный воздух. В этом случае газификация топлива осуществлялась еще медленнее, что приводило к некоторому ухудшению показателей процесса на выходе из циклона. Догорание продуктов газификации происходило на границе центральной и периферийной областей, в районе ориентирной поверхности $\alpha = 1$. Ввиду того, что характерные для циклонного потока циркуляционные зоны, расположенные в области периферийных потоков, не загружаются топливом, они лишаются в данном случае определяющей роли в топочном процессе и последний приобретает характерные черты факельного процесса: умеренная интенсивность, вытягивание в длину по ходу факела, опасность выноса процесса за пределы топочной камеры при увеличении нагрузки, приводящем к росту поступательных ско-

ростей. По той же причине на общей картине процесса мало сказывается изменение в широком диапазоне режимных и конструктивных параметров, поскольку они отзываются, в основном, на расположении и интенсивности циркуляционных зон, а не на центральной прямоточой области процесса. Процесс на жидком топливе при осевом его подводе в камеру данной конструкции явился как бы «зеркальным отображением» процесса на твердом топливе. Воздух, поступающий в циркуляционные зоны из «внутреннего первичного» воздуха процесса превратился здесь во «внутренний вторичный» воздух, вступающий в процесс лишь на стадии дожигания продуктов газификации. Наоборот, «внутренний вторичный» воздух центральной зоны в данном случае стал первичным воздухом, расходуемым на первой, газификационной стадии. Лишь зона взаимодействия первичного и вторичного потоков — зона заключительного смесеобразования, как и следовало ожидать, по-прежнему расположена на границе центрального прямого потока, в районе поверхности $w_x = 0$. Полученные экспериментальные факты, в общем, подтверждают выводы и предположения, вытекающие из схемы циклонного процесса Г. Ф. Кнорре (с учетом изменений, вызванных различным поведением в топке жидкого и твердого топлива). Это дает основание считать, что принципиальные положения этой схемы получают определенное экспериментальное подтверждение.

Наряду с подтверждением основных выводов схемы, проведение эксперимента при горении жидкого топлива позволило обнаружить ряд новых особенностей, не выявлявшихся ранее, при анализе чисто аэродинамических «холодных» структур. В частности, как это было видно уже по профилю осевых скоростей при горении, обратный центральный ток газов полностью вырождается и, следовательно, он не имеет даже той незначительной вспомогательной роли, какая отводилась ему в схеме процесса.

Далее, установлено, что приближение входного воздушного сопла к задней стенке циклона резко уменьшает интенсивность задней циркуляционной зоны, а при смещении сопла примерно на 0,4 от длины камеры эта зона, полностью вырождаясь, перестает играть предполагавшуюся по первоначальной схеме роль дополнительного газификатора твердого топлива. Газовоздушный поток, поворачивающий в «пазухе» и затем соединяющийся с центральным прямым потоком, приобретает полупрямоточный характер и, в данном случае, является лишь средством интенсификации заключительного смесеобразования,

т. е. завершения процесса горения топлива уже в газовой фазе (в основном, в пределах выходного сопла).

Наоборот, возникающая при смещении сопла передняя циркуляционная зона приобретает интенсивность даже большую, чем интенсивность задней зоны при несмещенном сопле и, будучи полностью загружена топливом, именно эта зона становится определяющей зоной интенсивной массовой газификации частиц твердого топлива. Следовательно, в противовес сложившемуся ранее мнению о раздвоении газификационной зоны при смещении входного сопла, обнаруживается почти полное вырождение задней и преобладающая роль передней, сильно развитой газификационной зоны. Это приводит к интенсификации замедленных процессов предварительной подготовки топлива, а следовательно, к интенсификации всего процесса в целом. Обнаруженное при структурных исследованиях уменьшение относительного количества «внутреннего первичного» воздуха, поступающего в зоны газификации при смещении воздушного сопла (с 70 до 45%), должно уменьшать суммарную теплоемкость первичной топливо-воздушной смеси и улучшать условия газификации за счет повышения температуры в зоне.

Таким образом, проведенное исследование выявляет причины того резкого улучшения процесса при работе со смещенным соплом, которое неизменно наблюдалось при общих стендовых исследованиях на самых различных режимах (Л 1), но до проведения структурных исследований не могло быть удовлетворительно объяснено.

Опытами установлено также, что значительное количество воздуха проходит из пазухи непосредственно в выходное сопло, а процесс смесеобразования завершается лишь в выходном сопле. Таким образом, выходное сопло, выполненное в виде «воротника», выступающего вглубь камеры, повидимому, не только служит для организации возвратного движения газов из «пазухи» и создания «ловушки» для частиц твердого топлива, но и играет важную роль интенсификатора заключительных стадий процесса сжигания топлива.

Факельный характер развития процесса горения жидкого топлива в циклонной камере данного типа ограничивает предельные тепловые нагрузки топки значениями, существенно более низкими, чем значения нагрузок циклонных топок, работающих на твердом топливе. Поэтому в работе делается отрицательный вывод относительно целесообразности применения такой топки в качестве **специализированной** высокофорсиро-

ванной топки для сжигания тяжелого жидкого топлива под паровыми котлами. Применение циклонной топки такого типа для жидкого топлива может быть оправдано лишь при использовании наряду с жидким топливом также и твердого (поочередно или совместно). В этом случае циклонная камера, в сочетании с развитыми подкотельными камерами охлаждения — дожигания, является универсальным, но не специализированным топочным устройством. Исходя из представлений о стадийном характере топочного процесса и о служебной роли циркуляционных аэродинамических зон, и используя полученные результаты изучения структуры, в работе рассмотрены интенсифицированные камеры, применяемые в настоящее время для жидкого топлива, в том числе циклонные топки и камеры сгорания газотурбинных двигателей. На основании этого рассмотрения в качестве наиболее перспективного направления для создания схемы интенсифицированной специализированной котельной топочной камеры для тяжелого жидкого топлива признается путь использования принципа массовой газификации топлива в пределах напряженных циркуляционных зон в сочетании с интенсивным дожиганием продуктов газификации в зонах заключительного смесеобразования. При этом возможно сочетание приемов и методов, нашедших свое осуществление как в циклонных топках для твердого топлива, так и в камерах сгорания газотурбинных двигателей.

Основные выводы.

1. Метод исследования огневой структуры циклонного топочного процесса с применением беззольного жидкого топлива оказался достаточно плодотворным: а) Он обеспечил возможность исследования с помощью доступных измерительных средств полей скоростей, концентраций и температур при огневой работе камеры. б) Он дал возможность более полно осветить зональную аэродинамическую структуру процесса, несмотря на то, что специфика горения жидкого топлива создала своего рода «зеркальное отображение» процесса на твердом топливе.

2. Исследование дало возможность получить общую картину расположения последовательных зон процесса и дать сравнительную оценку их интенсивности не только для жидкого, но, с известными коррективами, и для твердого топлива. В последнем случае исследование впервые, в целом, подтвердило экспериментальным путем схему циклонного топочного

Высш. Техник. училища

процесса, предложенную в свое время Г. Ф. Кнорре лишь на основе холодных аэродинамических исследований.

3. Проведенным исследованием впервые удалось объяснить резкое улучшение работы камеры при смещенном воздушном сопле переходом роли газификатора твердого топлива от относительно более слабой задней циркуляционной зоны к весьма интенсифицированной передней зоне. Это существенное уточнение схемы процесса и самая оценка интенсивности зон могли быть сделаны только при огневых структурных исследованиях.

4. Более полно и отчетливо установлена роль выходного сопла, образующего выступающий внутрь камеры «воротник», как интенсификатора процессов заключительного смесеобразования и, следовательно, догорания продуктов газификации топлива.

5. Вместе с тем, исследование показало, что несмотря на то, что процесс горения жидкого топлива в циклонной камере данного типа и приближается по своему характеру к факельному процессу, он все же оказывается достаточно сильно интенсифицированным, хотя и по косвенным причинам. Однако, несмотря на это, циклонную камеру данного типа нельзя признать рациональным специализированным топочным устройством для интенсифицированного сжигания тяжелого топлива (мазутов) под паровыми котлами. Рациональное решение должно быть найдено в сочетании положительных качеств современных камер сгорания, применяющихся для легких жидких топлив и циклонных камер для твердого топлива, что должно явиться предметом специального исследования.

Литература.

1. **Г. Ф. Кнорре, М. А. Наджаров** (редакторы). Циклонные топки Госэнергоиздат, М., 1958.

2. **М. А. Наджаров, В. И. Хвостов.** «Теплоэнергетика», № 4, 1955.

3. **М. А. Наджаров, В. И. Хвостов.** Исследование циклонного процесса сжигания твердого топлива на стенде. В сб. «Исследование котельно-топочных процессов», труды МВТУ, вып. 59, Машгиз, М—Л., 1955.

4. **В. И. Хвостов.** «Теплоэнергетика», № 1, 1958.

5. **В. И. Хвостов.** Изучение структуры процесса горения в циклонной топке при сжигании жидкого топлива. В сб. «Ис-

следование котельно-топочных процессов», труды МВТУ, вып. 94, Машгиз, М., 1958.

6. **Г. Ф. Кнорре.** Тепловые расчеты по газовому анализу. Госэнергоиздат, М., 1947.

7. **Л. Л. Калишевский.** Структура потока и аэродинамические характеристики циклонной камеры при горении. В сб. «Исследование котельно-топочных процессов», труды МВТУ, вып. 94, Машгиз, М., 1958.

Л. 38570 от 24/VII—59 г. Зак. 1455. Тир. 150