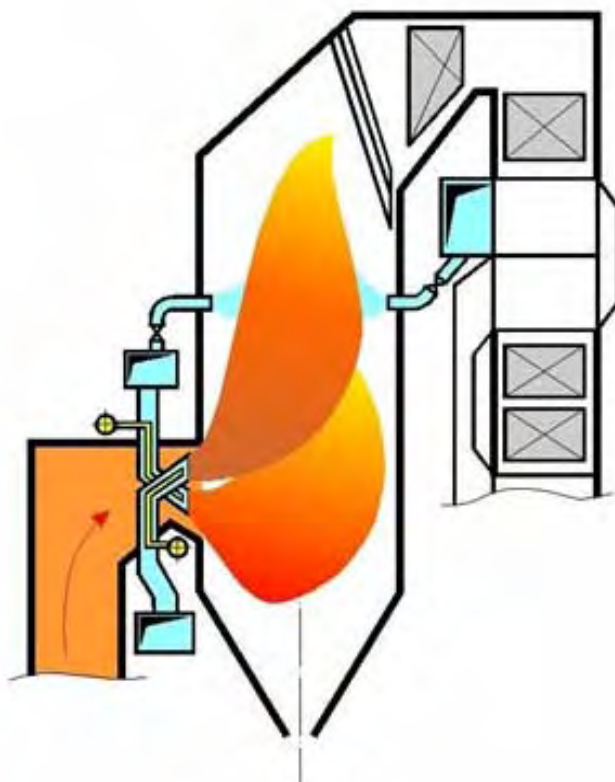


В.Н.Белоусов, С.Н.Сморозин, О.С.Смирнова

ТОПЛИВО И ТЕОРИЯ ГОРЕНИЯ

Часть II. Теория горения

Учебное пособие



**Санкт-Петербург
2011**

Министерство образования и науки Российской Федерации

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования

«Санкт-Петербургский государственный технологический
университет растительных полимеров»

*80-летию СПбГТУРП
посвящается*

В.Н.Белоусов, С.Н.Сморозин, О.С.Смирнова

ТОПЛИВО И ТЕОРИЯ ГОРЕНИЯ

Часть II. Теория горения

Учебное пособие

**Санкт-Петербург
2011**

ББК 31.35я 7
Б 438
УДК 662.6 (075)

Белоусов В.Н., Смородин С.Н., Смирнова О.С. Топливо и теория горения.
Ч.І. Топливо: учебное пособие / СПбГТУРП. – СПб., 2011. – 84 с.: ил.15.

В учебном пособии «Топливо и теория горения» ч.ІІ «Теория горения» рассмотрены материальный и тепловой баланс процесса горения твёрдого, жидкого и газообразного топлива, способы сжигания топлива, конструкции топочных устройств, мазутных форсунок и горелок, особенности сжигания различных видов топлива, кинетика и экологическая безопасность процессов горения.

Пособие содержит необходимый нормативно-справочный и иллюстративный материал. Предназначено для получения базовых знаний и выполнения курсовых и дипломных проектов, связанных с процессами горения, студентами энергетических, политехнических и технологических вузов, обучающихся по специальностям 140104 «Промышленная теплоэнергетика», 140105 «Энергетика теплотехнологий» всех форм обучения.

Авторы выражают благодарность Е.В.Васильевой за оформление иллюстративного материала.

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор кафедры реакторо- и парогенераторостроения Санкт-Петербургского государственного политехнического университета В.В.Сергеев;

технический директор ООО «Гарант-проект», кандидат технических наук, доцент О.Н. Мишин.

Рекомендовано Редакционно-издательским советом университета в качестве учебного пособия.

© ГОУ ВПО Санкт-Петербургский
государственный технологический
университет растительных полимеров, 2011
© В.Н.Белоусов, С.Н.Смородин,
О.С.Смирнова, 2011

1. Историческое развитие общих представлений о горении

До середины XVIII в. в науке господствовало метафизическое представление о горении как о выделении особого “вещества огня” с отрицательным весом, названного “флогистон”.

Великий русский учёный М.В.Ломоносов в 1756 г. положил начало современному научному представлению о горении как о процессе соединения горючего вещества с “тяжёлыми частицами воздуха”.

В 1773 г. французский учёный А.Лавуазье установил роль кислорода в горении и тем самым окончательно подтвердил представление о горении как о химическом окислительном процессе.

В конце XIX в. французский учёный Ле Шателье, а также русский В.А.Михельсон впервые выявили роль физических и тепловых параметров в процессе горения.

Основы теории горения газообразных топлив разработаны советскими и зарубежными учёными, такими как: Н.Н.Семёнов, Н.А.Шилов, Я.Б.Зельдович, Д.А.Франк-Каменецкий, Л.Н.Хитрин, С.Хиншелвуд, Г.Эльбе, Г.Хоттель и др.

За выдающиеся работы по установлению и исследованию механизма цепного горения газов Н.Н.Семёнову и С.Хиншелвуду в 1956 г. была присуждена Нобелевская премия.

Фундаментальные исследования процесса горения углерода были выполнены коллективами учёных МГУ, МЭИ и ВТИ (чл.-корр. АН СССР А.С.Предводителей).

Всестороннее и комплексное исследование сложного процесса горения твёрдого топлива проведено коллективами учёных ЦКТИ, ЛПИ, МВТУ (проф. Г.Ф.Кнорре).

Эти работы, а также более поздние исследования ряда советских, российских и зарубежных учёных и коллективов составляют основу современной теории горения.

Развитие науки о горении неразрывно связано с практикой топливосжигания. Большие заслуги в создании наиболее эффективных методов сжигания различных топлив принадлежат советским учёным-энергетикам, таким как К.В.Кирш, В.Н.Шретер, Т.В.Макарьев, Г.Ф.Кнорре, В.В.Померанцев и др.

2. Общие сведения о горении

Основу горения составляют самоускоряющиеся реакции окисления горючих веществ топлива, в результате которых исходные вещества (горючее и окислитель) преобразуются в продукты сгорания, т.е. в новые вещества с иными физическими и химическими свойствами.

Характерным признаком горения является быстропротекающий процесс, сопровождающийся интенсивным выделением теплоты и резким повышением температуры. Для протекания химической реакции между горючими веществами топлива и окислителем, прежде всего, необходимо создать физический контакт между молекулами взаимодействующих веществ и довести молекулы до такого состояния, при котором становятся возможными химические реакции между ними.

Первое (т.е. физический контакт) осуществляется в процессе образования горючей смеси, второе – при её воспламенении.

Таким образом, **горение** – это сложный **физико-химический процесс**, включающий в себя ряд последовательно и параллельно протекающих физических и химических стадий.

Различают **полное горение**, т.е. без потерь теплоты, и **неполное**, т.е. с потерями теплоты. При полном горении все горючие вещества топлива

принимают участие в окислительных процессах, при этом образуются только оксиды – CO_2 , SO_2 , H_2O .

Реальное горение, как правило, является неполным. Различают **механическую** и **химическую** неполноту сгорания.

В первом случае (**механический недожог**) некоторое количество топлива в процессе горения топлива не участвует. Например, газовым потоком из топки выносятся наиболее мелкие фракции угля, а наиболее крупные, наоборот, могут оседать в нижней части топки (на поду) и удаляться вместе с золой и шлаком. В слоевой топке возможен также провал мелких фракций топлива через отверстия колосниковой решётки.

Потери с **химическим недожогом** возникают в случае химически неполного окисления углеродсодержащих соединений с образованием окиси углерода CO , а также в случае, когда часть горючих газообразных веществ, образовавшихся при испарении и термическом разложении жидкого и твёрдого топлива (CO , H_2 , CH_4 и др.), покидает топку до завершения окислительных процессов.

В качестве окислителя при горении преимущественно используется не чистый кислород, а атмосферный **воздух**, что объясняется его доступностью и простотой использования.

В технологических установках, например, мартеновских или доменных печах, применяется также воздух, обогащённый кислородом, или чистый кислород.

Расход кислорода $V_{\text{O}_2}^0$ или воздуха V^0 , теоретически необходимый для полного сгорания единицы количества топлива (килограмм или кубометр), определяется из стехиометрических уравнений горения.

При реальном горении, в зависимости от назначения огнетехнического устройства, действительное количество окислителя (кислорода или воздуха) может быть больше или меньше теоретически необходимого. Отношение

действительного количества воздуха к теоретически необходимому называется **коэффициентом избытка воздуха**: $\alpha = V / V^0$.

При сжигании органических топлив в топках энергетических котлов коэффициент избытка воздуха всегда больше 1 ($\alpha > 1$).

3. Материальный баланс процесса горения

Вообще, что же такое материальный баланс?

*Несмотря на то, что далеко не каждый получает удовольствие от приготовления пищи, наверное, общие представления о том, как это делается, доступны всем. Например, для того, чтобы сварить кастрюлю солянки, требуются следующие продукты: томатная паста, мясо, сосиски, картофель, морковь, оливки, сахар, соль. (Возможно, ещё что-то, - мы же изучаем не кулинарию). А ещё надо бы добавить несколько ломтиков лимона, а в тарелку положить сметану (по вкусу). Причём, в зависимости от соотношения этих ингредиентов, итоговый продукт может получиться очень вкусным или вообще несъедобным. Так вот, соотношение исходных компонентов и конечных продуктов, отнесённое к единице объёма воды, можно назвать **материальным балансом** процесса приготовления солянки.*

Поскольку в основе процесса горения лежит реакция окисления горючих компонентов топлива, то материальный баланс процесса горения выражает количественное соотношение между исходными компонентами (топливо и окислитель) и конечными продуктами (дымовые газы, т.е. продукты сгорания), отнесённое к единице объёма (или массы) топлива.

Несмотря на то, что непосредственным окислителем в реакциях горения является кислород, на практике чистый кислород используется очень редко (лишь в специфических технологических процессах). В теплоэнергетике в качестве окислителя используется воздух как наиболее

доступный и дешёвый газ, в котором содержится примерно 21 % кислорода (по объёму). Оставшиеся примерно 79 % составляет азот (концентрация других компонентов, как правило, ничтожно мала), который при нормальных условиях не принимает участия в процессе горения, поскольку является инертным газом. При высоких температурах, к сожалению (или даже - к несчастью), протекают реакции образования высокотоксичных оксидов азота (их принято называть NOx). Но это уже другие реакции, которые к материальному балансу процесса горения отношения не имеют.

Материальный баланс процесса горения твёрдого и жидкого топлива составляется на 1 кг топлива. Первоочередной целью материального баланса является определение теоретического объёма воздуха, необходимого для полного сгорания топлива, а также теоретического объёма продуктов сгорания. *Переходя на язык “чайников”, необходимо определить, сколько кубометров воздуха надо подать в топку в пересчёте на каждый килограмм топлива и сколько кубометров продуктов сгорания при этом образуется (опять-таки при сгорании 1 кг топлива).*

Определение объёмов воздуха и продуктов сгорания – это не самоцель. Впоследствии, когда по результатам теплового баланса будет найден секундный расход топлива, определяют секундные расходы воздуха и дымовых газов, необходимые для выбора (по результатам аэродинамического расчёта котла) соответствующего тягодутьевого оборудования: вентилятора и дымососа.

Поскольку речь зашла о тепловом балансе, сделаем небольшое отступление и начнём с определения расхода топлива, ведь именно в топливе скрыта потенциальная энергия, выделяющаяся в процессе горения в виде горячих дымовых газов, теплота которых, в свою очередь, передаётся в котле воде, превращая её в пар (если речь идёт о паровом котле).

Любая теплотехническая установка, в которой осуществляются сжигание топлива и передача тепла дымовых газов “рабочему телу” (под

“рабочим телом” понимается вода, пар или любой другой теплоноситель, в зависимости от назначения установки), характеризуется такими параметрами, как **производительность и тепловая мощность**. В связи с тем, что в теплоэнергетике и теплотехнике мы имеем дело с установками непрерывного действия, выражать теплоту, выделившуюся при сжигании топлива, в Джоулях (Дж) бессмысленно. Целесообразно характеризовать тепловую нагрузку количеством теплоты, выделившейся в единицу времени, т.е. Джоуль в секунду, а в системе СИ $1 \text{ Дж/с} = 1 \text{ Вт}$. В ваттах измеряется мощность, поэтому мы и используем термин – тепловая мощность. Производительность котельного агрегата, как правило, указана в самой маркировке. Например, ДКВР-20/13 или БКЗ-75/40. Здесь первое число представляет собой количество генерируемого пара (20 т/ч насыщенного пара в ДКВР и, соответственно, 75 т/ч перегретого пара в БКЗ), а второе число – давление пара (атм).

Для покрытия проектной номинальной нагрузки необходимо сжечь определённое количество топлива. Спектр используемых топлив довольно широк: природный газ, мазут, бурый или каменный уголь, очень “модные” на сегодняшний день древесные пеллеты, кора и многие другие. При этом каждое топливо характеризуется таким важнейшим параметром, как **теплотворная способность**, или **теплота сгорания**. Естественно, что требуемый расход высококалорийного мазута будет значительно меньше расхода низкокалорийного бурого угля.

Для определения расхода топлива составляется так называемый **тепловой баланс** котельного агрегата, т.е. опять баланс, только не материальный, а тепловой. Вообще, в основе большинства теплотехнических расчётов как раз лежат уравнения теплового и материального баланса. Эти уравнения (их суть) необходимо понять и осознать, а не заучивать и запоминать.

Левая часть уравнения теплового баланса (например, котла) представляет собой количество тепла, выделившегося (в единицу времени) при сгорании определённого количества заданного топлива, т.е. это произведение расчётного расхода топлива B_p (кг/с) на его удельную теплоту сгорания Q_i^r (МДж/кг). В результате получаются МДж/с, т.е. МВт – тепловая мощность котла.

В правой части уравнения теплового баланса – полезное тепло, которое затрачивается на образование заданного по проекту количества пара определённых параметров (давление и температура). Это полезное тепло при выработке насыщенного пара, соответственно, получится (в упрощённом виде, без некоторых нюансов) умножением расхода пара $D_{нп}$ (кг/с) на разность энтальпий насыщенного пара $i_{нп}$ и питательной воды $i_{пв}$.

Под полезным теплом мы понимаем лишь ту его часть, которая действительно пошла на парообразование. Ведь в реальных условиях при сжигании топлива существуют **потери тепла с уходящими газами** Q_2 , с химическим Q_3 и механическим недожогом Q_4 , потери тепла в окружающую среду через обмуровку котла Q_5 , а также потери с физическим теплом шлака Q_6 (при сжигании твёрдых топлив). Сумма этих потерь определяет величину КПД котла $\eta_{ка}$. Поэтому при составлении теплового баланса левую его часть необходимо умножить на КПД:

$$B_p Q_i^r \eta_{ка} = D_{нп} (i_{нп} - i_{пв}). \quad (1)$$

Из уравнения теплового баланса определяют расход топлива, и, как уже отмечалось, с помощью материального баланса и аэродинамического расчёта выбирают тягодутьевое оборудование.

Однако мы отвлеклись от основной темы, т.е. материального баланса процесса горения топлива.

Материальный баланс процесса горения выражает количественные соотношения между исходными веществами (топливо, воздух) и конечными продуктами (дымовые газы).

Составление материального баланса можно *условно* разделить на две стадии:

- определение объёма воздуха, теоретически необходимого для полного сгорания топлива, и теоретического объёма продуктов сгорания;
- определение действительных объёмов воздуха и продуктов сгорания (с учётом коэффициента избытка воздуха).

Для твёрдого и жидкого топлива материальный баланс составляется на 1 кг топлива, для газообразного – на 1 м³ сухого газа при нормальных условиях ($P = 0,1013$ МПа, $t = 0$ °С).

3.1. Материальный баланс процесса горения твёрдого и жидкого топлива

Согласно **закону Дальтона**, горючие составляющие топлива вступают в химическое реагирование с кислородом в определённом количественном соотношении, определяемом из **стехиометрических уравнений** полного горения углерода, водорода и серы, записанных для одного 1 кмоль каждого горючего элемента:



При расчёте объёмов воздуха и продуктов сгорания условно принимают, что все горючие составляющие окисляются полностью, т.е. в соответствии с реакциями (2а, б, в).

Из уравнения (2а) следует, что для полного окисления одного моля углерода (молекулярная масса углерода $\mu_C = 12$ кг) расходуется 1 моль

кислорода, и образуется 1 моль двуокиси углерода CO_2 . Выразив газообразные составляющие (O_2 и CO_2) в объёмных единицах (объём 1 моля любого газа при нормальных условиях составляет $22,4 \text{ м}^3$), получим, что для полного сгорания 1 кг углерода потребуется $22,4/12 = 1,866 \text{ м}^3$ кислорода, при этом образуется $1,866 \text{ м}^3 \text{ CO}_2$. При известном составе рабочей массы в 1 кг топлива содержится $(C^r/100)$ кг углерода, а для его полного сгорания необходимо $1,866(C^r/100) \text{ м}^3$ кислорода, и при этом образуется $1,866(C^r/100) \text{ м}^3 \text{ CO}_2$.

Аналогично, из уравнения (2б) на окисление водорода ($\mu_{\text{H}_2} = 2,02 \text{ кг}$), содержащегося в 1 кг топлива, потребуется $0,5(22,4/2,02)(H^r/100) \text{ м}^3$ кислорода, при этом образуется $(22,4/2,02)(H^r/100) \text{ м}^3$ водяного пара, а, как следует из уравнения (2в), на окисление горючей серы ($\mu_S = 32 \text{ кг}$), содержащейся в 1 кг топлива, потребуется $(22,4/32)(S^r/100) \text{ м}^3$ кислорода, и образуется такой же объём SO_2 . (Здесь и далее под S^r будет подразумеваться содержание горючей, или летучей, серы).

Суммируя полученные выражения и учитывая кислород, который содержится в топливе ($\mu_{\text{O}_2} = 32 \text{ кг}$), после несложных преобразований получим формулу для определения количества кислорода, теоретически необходимого для полного сжигания 1 кг твёрдого или жидкого топлива:

$$V^{\text{O}}_{\text{O}_2} = 0,01(1,866 C^r + 5,55 H^r + 0,7 S^r - 0,7 O^r), \text{ м}^3 / \text{ кг}.$$

Объёмная доля кислорода получается умножением массовой доли $O^r/100$ на удельный объём кислорода, равный $22,4/32 = 0,7 \text{ м}^3/\text{кг}$.

Как уже отмечалось, в воздухе содержится примерно 21 % кислорода (по объёму), поэтому **количество воздуха**, теоретически необходимого для полного сгорания 1 кг топлива:

$$V^{\text{O}} = (100/21)V^{\text{O}}_{\text{O}_2} = 0,0889 C^r + 0,265 H^r + 0,033 S^r - 0,033 O^r, \text{ м}^3/\text{кг}.$$

В результате полного сгорания топлива образуются газообразные продукты, которые состоят из CO_2 , SO_2 , H_2O и N_2 . Оксиды углерода и

серы являются сухими трёхатомными газами, которые принято объединять и обозначать $RO_2 = CO_2 + SO_2$.

При горении твёрдых и жидких топлив теоретические объёмы продуктов сгорания вычисляются в соответствии со стехиометрическими уравнениями (2а,б,в) с учётом содержания соответствующих компонентов в топливе и воздухе.

Теоретический объём трёхатомных газов в соответствии с уравнениями (2а, в):

$$V^0_{RO_2} = 0,01(1,866 C^r + 0,7 S^r), \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

Теоретический объём азота равен объёму азота, поступившего с воздухом $V^{возд}_{N_2}$, и объёму азота, выделяемого из топлива $V^r_{N_2}$:

$$\begin{aligned} V^0_{N_2} &= V^{возд}_{N_2} + V^r_{N_2} = 0,79 V^0 + (N^r/100)(22,4/28) = \\ &= 0,79 V^0 + 0,8 N^r/100, \text{ м}^3/\text{кг}. \end{aligned}$$

Здесь первое слагаемое получается в результате того, что 21 % воздуха (т.е. кислород) расходуется на окисление горючих компонентов, а 79 % представляет собой инертный азот. Таким образом, зная теоретический объём воздуха, легко определить теоретический объём азота, внесённого воздухом $0,79V^0$. Второе слагаемое, т.е. объём азота, внесённого с топливом, получается умножением массового содержания азота в топливе $N^r/100$ на удельный объём азота, равный $22,4/28 = 0,8 \text{ м}^3/\text{кг}$ (молекулярная масса азота $\mu_{N_2} = 28 \text{ кг}$).

Теоретический объём водяного пара $V^0_{H_2O}$ складывается из следующих составляющих:

- водяные пары, образующиеся при сгорании водорода, входящего в состав топлива $V^H_{H_2O}$ (реакция 2б);
- водяные пары, образующиеся при испарении влаги топлива $V^w_{H_2O}$;
- водяные пары, вносимые в топку с окислителем (воздухом) $V^{возд}_{H_2O}$.

Объём водяных паров, образующихся при сгорании водорода $V_{H_2O}^H$, определяется в соответствии со стехиометрическим уравнением (2б), т.е. при сгорании 1 моля водорода ($\mu_{H_2} = 2,02$ кг) образуется 1 моль водяного пара ($22,4$ м³):

$$V_{H_2O}^H = (H^r/100) (22,4/2,02) = 0,111H^r, \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Объём водяных паров, образующихся при испарении влаги, входящей в состав топлива:

$$V_{H_2O}^W = (W^r/100)v_{H_2O} = 0,0124W^r, \text{ м}^3/\text{кг},$$

где $v_{H_2O} = 22,4/18 = 1,24$ – удельный объём водяного пара, м³/кг.

Объём водяных паров, вносимых с воздухом, зависит от теоретического объёма воздуха V^0 и его влагосодержания d_v .

Влагосодержание воздуха выражается в кг влаги на кг воздуха. Для перевода кг воздуха в м³ необходимо умножить выражение на плотность воздуха ρ_v , а умножением на удельный объём водяного пара v_{H_2O} мы добиваемся перевода массовых долей пара в объёмные.

$$V_{H_2O}^{возд} = V^0 d_v \rho_v v_{H_2O} = V^0 \cdot 0,01 \cdot 1,293 \cdot 1,24 = 0,0161V^0, \text{ м}^3/\text{кг},$$

где d_v – влагосодержание воздуха (принимается $d_v = 0,01$ кг влаги/кг воздуха),

$\rho_v = 1,293$ кг/м³ – плотность воздуха при $t = 0$ °С.

В итоге **теоретический объём водяных паров:**

$$V_{H_2O}^0 = 0,111H^r + 0,0124W^r + 0,0161V^0, \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Примечание. При паровом распылении мазута теоретический объём водяного пара увеличивается на объём водяного пара, подаваемого в форсунку:

$$V_{H_2O}^\Phi = G_\Phi(22,4/18) = 1,24G_\Phi,$$

где G_Φ – удельный расход пара на распыление мазута, кг пара/кг мазута.

Суммарный теоретический объём продуктов сгорания:

$$V_{\text{г}}^0 = V_{\text{RO}_2}^0 + V_{\text{N}_2}^0 + V_{\text{H}_2\text{O}}^0, \text{ м}^3/\text{кг}.$$

3.2. Материальный баланс процесса горения газа

Газообразное топливо представляет собой смесь различных горючих и негорючих газов. Основными горючими составляющими большинства газообразных топлив являются предельные углеводороды метанового ряда, а также водород, оксид углерода и иногда сероводород. Негорючий балласт газообразного топлива, как правило, состоит из двуокиси углерода, азота и кислорода.

Для **газообразного топлива** материальный баланс составляется на 1 м^3 сухого газа при нормальных условиях.

Согласно закону Дальтона горючие составляющие газа вступают в химическое реагирование с кислородом в определённом количественном соотношении, определяемым из стехиометрических уравнений горения углеводородов (общая формула C_mH_n), водорода H_2 , оксида углерода CO и сероводорода H_2S , записанных для 1 кмоль каждого горючего элемента:

- а) $\text{C}_m\text{H}_n + (m+0,25n) \text{O}_2 = m \text{CO}_2 + 0,5n \text{H}_2\text{O}$;
 - б) $\text{H}_2 + 0,5 \text{O}_2 = \text{H}_2\text{O}$;
 - в) $\text{CO} + 0,5 \text{O}_2 = \text{CO}_2$;
 - г) $\text{H}_2\text{S} + 1,5 \text{O}_2 = \text{H}_2\text{O} + \text{SO}_2$.
- (3)

При расчёте объёмов воздуха и продуктов сгорания условно принимают, что все горючие составляющие окисляются полностью, т.е. в соответствии с реакциями (3а, б, в, г).

Из уравнения 3б, например, следует, что для полного окисления 1 моля водорода потребуется 0,5 моля кислорода, и образуется 1 моль водяного пара H_2O . Объём 1 моля любого газа при нормальных условиях – величина постоянная ($22,4 \text{ м}^3$), следовательно, для полного сгорания **1 м^3 водорода** потребуется **0,5 м^3 кислорода**, при этом образуется **1 м^3 CO_2** .

Тогда теоретический объём кислорода, необходимого для полного окисления водорода, входящего в состав газа (при известном объёмном содержании водорода в газе H_2^T , %), определяется как

$$0,5(H_2^T/100), \text{ м}^3 \text{ O}_2 / \text{ м}^3 \text{ газа},$$

при этом объём образовавшихся водяных паров:

$$(H_2^T/100), \text{ м}^3 \text{ H}_2\text{O} / \text{ м}^3 \text{ газа}.$$

Аналогично определяется объём кислорода, необходимого для полного окисления углеводородов, из уравнения (3а) $\sum(m+0,25n)C_mH_n^T$, оксида углерода из уравнения (3в) $0,5CO^T$, сероводорода из уравнения (3г) $1,5H_2S^T$.

Суммируя полученные выражения и учитывая кислород, который содержится в топливе O_2^T , получим выражение для определения объёма кислорода, теоретически необходимого для полного сгорания 1 м^3 газа:

$$V^0_{O_2} = 0,01(\sum(m+0,25n)C_mH_n^T + 0,5H_2^T + 0,5CO^T + 1,5H_2S^T - O_2^T), \text{ м}^3 \text{ O}_2/\text{ м}^3 \text{ газа}.$$

Объём воздуха, теоретически необходимого для полного сгорания 1 м^3 газообразного топлива (с учётом концентрации кислорода в воздухе):

$$V^0 = (100/21)V^0_{O_2} = \\ = 0,0476(\sum(m+0,25n)C_mH_n^T + 0,5H_2^T + 0,5CO^T + 1,5H_2S^T - O_2^T), \text{ м}^3/\text{ м}^3.$$

В результате полного сгорания топлива образуются газообразные продукты, состоящие из трёхатомных газов, водяных паров и азота.

Теоретические объёмы продуктов сгорания вычисляются в соответствии со стехиометрическими уравнениями (3а, б, в, г) с учётом содержания соответствующих компонентов в топливе и воздухе.

Теоретический объём трёхатомных газов складывается из следующих составляющих:

$V_{CO_2}^{C_mH_n}$ – объём CO_2 , образовавшегося в результате сгорания углеводородов по реакции (3а);

$V_{CO_2}^{CO}$ – объём CO_2 , образовавшегося в результате сгорания оксида

углерода по реакции (3в);

$V_{\text{SO}_2}^{\text{H}_2\text{S}}$ – объём SO_2 , образовавшегося в результате сгорания сероводорода по реакции (3г);

$V_{\text{CO}_2}^{\text{T}}$ – объём CO_2 , входящего в состав топлива.

Таким образом, с учётом стехиометрических коэффициентов, теоретический объём трёхатомных газов:

$$\begin{aligned} V_{\text{RO}_2}^0 &= V_{\text{CO}_2}^{\text{C}_m\text{H}_n} + V_{\text{CO}_2}^{\text{CO}} + V_{\text{SO}_2}^{\text{H}_2\text{S}} + V_{\text{CO}_2}^{\text{T}} = \\ &= 0,01(\sum m \text{C}_m\text{H}_n^{\text{T}} + \text{CO}^{\text{T}} + \text{H}_2\text{S}^{\text{T}} + \text{CO}_2^{\text{T}}), \text{ м}^3 \text{ RO}_2/\text{м}^3 \text{ газа.} \end{aligned}$$

Теоретический объём азота равен сумме объёма азота, поступившего с воздухом $V_{\text{N}_2}^{\text{возд}}$, и объёма азота, входящего в состав газообразного топлива $V_{\text{N}_2}^{\text{T}}$:

$$V_{\text{N}_2}^0 = V_{\text{N}_2}^{\text{возд}} + V_{\text{N}_2}^{\text{T}} = 0,79 V^0 + 0,01 \text{N}_2^{\text{T}}, \text{ м}^3 \text{ N}_2/\text{м}^3 \text{ газа.}$$

Теоретический объём водяных паров $V_{\text{H}_2\text{O}}^0$ складывается из следующих составляющих:

$V_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{C}_m\text{H}_n}$ – водяные пары, образующиеся при сгорании углеводородов по реакции (3а);

$V_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{H}_2}$ – водяные пары, образующиеся при сгорании водорода по реакции (3б);

$V_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{H}_2\text{S}}$ – водяные пары, образующиеся при сгорании сероводорода по реакции (3г);

$V_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{T}} = v_{\text{H}_2\text{O}} \cdot d_{\text{г}} = 1,24 d_{\text{г}}$ – водяные пары, внесённые в зону горения с топливом (газом) – здесь $d_{\text{г}} = 0,01 \text{ кг}/\text{м}^3$ – влагосодержание газа;

$V_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{B}}$ – водяные пары, внесённые в зону горения с воздухом.

Объём водяных паров, вносимых с воздухом, зависит от теоретического объёма воздуха V^0 и его влагосодержания $d_{\text{в}}$:

$$V_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{B}} = V^0 d_{\text{в}} \rho_{\text{в}} v_{\text{H}_2\text{O}} = 0,0161 V^0 \text{ м}^3 \text{ H}_2\text{O}/\text{м}^3 \text{ газа,}$$

где $d_{\text{в}} = 0,01 \text{ кг влаги}/\text{кг воздуха}$ – влагосодержание воздуха;

$\rho_B = 1,293 \text{ кг/м}^3$ – плотность воздуха;

$v_{H_2O} = 22,4/18 = 1,24 \text{ м}^3/\text{кг}$ – удельный объём водяного пара.

Таким образом, **теоретический объём водяных паров**:

$$V^0_{H_2O} = V_{H_2O}^{C_m H_n} + V_{H_2O}^{H_2} + V_{H_2O}^{H_2S} + V_{H_2O}^T + V_{H_2O}^B = \\ = 0,01(\sum 0,5n C_m H_n^T + H_2^T + H_2S^T) + 1,24 d_r + 0,0161V^0, \text{ м}^3 \text{ H}_2\text{O}/\text{м}^3 \text{ газа}.$$

Суммарный **теоретический объём продуктов сгорания**:

$$V^0_r = V^0_{RO_2} + V^0_{N_2} + V^0_{H_2O}, \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

3.3. Действительный объём воздуха и продуктов сгорания

В процессе горения, по мере расходования топлива и кислорода и уменьшения их действующих концентраций, выгорание замедляется. Условия реагирования ухудшаются также в связи со сложностью перемешивания больших количеств топлива и окислителя.

Таким образом, в связи с несовершенством аэродинамики топочных устройств и невозможностью идеального (т.е. на молекулярном уровне) смешения топлива и окислителя в реальных условиях, для полного сгорания топлива необходимо несколько большее количество воздуха, чем теоретический объём воздуха, полученный из стехиометрических уравнений горения.

Как уже отмечалось, отношение действительного объёма воздуха V к теоретически необходимому V^0 называется коэффициентом избытка воздуха $\alpha = V / V^0$.

Таким образом, действительный объём воздуха, поступающего в зону горения:

$$V = \alpha V^0 \text{ или } V = V^0 + (\alpha - 1)V^0,$$

где $(\alpha - 1)V^0$ – избыточный воздух.

Действительный объём продуктов сгорания будет больше теоретического за счёт азота, кислорода и водяного пара, содержащихся в избыточном воздухе.

Так как воздух практически не содержит трёхатомных газов, то их объём не зависит от коэффициента избытка воздуха и остаётся постоянным, равным теоретическому:

$$V_{\text{RO}_2} = V^0_{\text{RO}_2}.$$

В реальных условиях при любом (сколь угодно большом) значении коэффициента избытка воздуха на окисление горючих компонентов пойдёт лишь тот объём, который теоретически необходим, согласно стехиометрическим соотношениям, а весь избыточный воздух добавится к продуктам сгорания. Поэтому речь уже пойдёт не об объёме азота, а об объёме двухатомных газов, ведь, кроме азота, избыточный воздух содержит и кислород.

Объём двухатомных газов включает в себя теоретический объём азота и избыточный воздух:

$$V_{\text{R}_2} = V^0_{\text{N}_2} + (\alpha - 1) V^0.$$

Действительный объём водяных паров увеличивается (по сравнению с теоретическим) на количество водяных паров, внесённых с избыточным воздухом:

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = V^0_{\text{H}_2\text{O}} + 0,0161 (\alpha - 1) V^0.$$

Суммарный объём продуктов сгорания:

$$V_{\text{r}} = V_{\text{RO}_2} + V_{\text{R}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} = V^0_{\text{r}} + 1,0161 (\alpha - 1) V^0.$$

4. Выбор оптимального значения коэффициента избытка воздуха в топке

Коэффициент избытка воздуха в топке α_T выбирается в зависимости от:

- вида топлива (теплотехнических характеристик топлива);
- способа сжигания;
- конструкции топки;
- способа образования горючей смеси (конструкции горелки) и др.

Определяющими факторами при выборе оптимального значения коэффициента избытка воздуха являются минимальные суммарные потери с уходящими газами Q_2 и химическим и механическим недожогом Q_3 и Q_4 .

Увеличение избытка воздуха (рис. 1) приводит к росту потерь теплоты с уходящими газами (Q_2), а снижение — к повышению потерь с химическим и механическим недожогом топлива (Q_3 , Q_4).

Оптимальное значение коэффициента избытка воздуха будет соответствовать минимальному значению суммы потерь $Q_2 + Q_3 + Q_4$.

Рис.1. К определению оптимального коэффициента избытка воздуха

Оптимальные значения коэффициента избытка воздуха в топке α_T при сжигании:

мазута $1,05 \div 1,1$;

природного газа $1,05 \div 1,1$;

твердого топлива:

камерное (факельное) сжигание $1,15 \div 1,2$;

слоевое сжигание $1,3 \div 1,4$.

Расчетный коэффициент избытка воздуха α в топке устанавливается согласно нормам теплового расчета котла.

Уменьшение избытка воздуха приводит к экономии расхода энергии на привод тягодутьевых машин и повышению КПД котла, однако его снижение ниже расчетного значения ведет к быстрому росту недожога топлива и снижает экономичность.

При работе котла под разрежением, создаваемым дымососом, происходит подсос в газовый тракт холодного воздуха из окружающей среды. За счет этого объём продуктов сгорания увеличивается, возрастает избыток воздуха, и снижается температура газов.

Присосы определяются в долях теоретически необходимого объёма воздуха $\Delta\alpha_i = \Delta V_i / V^0$,

где ΔV_i – объём присосов воздуха в пределах i -й поверхности котла.

Тогда избыток воздуха за i -й по порядку поверхностью нагрева после топки определится как $\alpha_I = \alpha_T + \Sigma \Delta\alpha_i$.

Для обеспечения оптимальных условий горения и минимума присосов воздуха по газовому тракту необходим постоянный контроль за избытками воздуха в газовом тракте.

Как уже было отмечено, коэффициент избытка воздуха, в соответствии с определением, равен отношению действительно поданного количества воздуха к теоретически необходимому:

$$\alpha = \frac{V}{V^0} = \frac{V}{V - \Delta V}, \quad (4)$$

где ΔV – избыточное количество воздуха.

Не учитывая увеличения содержания азота в дымовых газах за счет азота топлива (доля его действительно ничтожна мала), можно записать, что объём всего воздуха, подаваемого на горение, связан с объёмом азота в дымовых газах следующим соотношением:

$$V = \frac{100}{79} V_{N_2}. \quad (5)$$

Избыточное количество воздуха, подаваемого на горение, связано с объёмом кислорода, не вступившим в реакцию, соотношением:

$$\Delta V = \frac{100}{21} V_{O_2}. \quad (6)$$

Подставляя (5) и (6) в (4), получим азотную формулу:

$$\alpha = \frac{\frac{100}{79} V_{N_2}}{\frac{100}{79} V_{N_2} - \frac{100}{21} V_{O_2}} = \frac{1}{1 - \frac{79}{21} \frac{O_2}{N_2}}.$$

При наличии химического недожога расчёт ведётся на количество кислорода O_2^* , который должен был прореагировать при полном окислении горючих элементов в соответствии со стехиометрическими уравнениями горения:

$$O_2^* = O_2 - 0,5(CO + H_2) - 2CH_4.$$

Тогда **азотная формула** примет окончательный вид:

$$\alpha = \frac{1}{1 - \frac{79}{21} \cdot \frac{O_2 - 0,5(CO + H_2) - 2CH_4}{N_2}}.$$

Таким образом, для **точного определения коэффициента избытка** воздуха необходимо измерить практически полный состав продуктов сгорания, а именно: концентрации кислорода, азота, оксида углерода, водорода, метана.

На практике используются два более упрощённых метода определения коэффициента избытка воздуха: **по концентрации кислорода и по концентрации сухих трехатомных газов** в продуктах сгорания.

Основным является метод прямого определения концентрации кислорода. Пересчёт процентного содержания кислорода в продуктах сгорания на значение избытка воздуха производится исходя из следующих соображений.

Пусть горючая часть топлива не содержит водорода. При окислении углерода и серы объёмы образовавшихся диоксидов углерода и серы равны объёму израсходованного кислорода ($C+O_2=CO_2$, $S+O_2=SO_2$), при этом концентрация азота при любом коэффициенте избытка воздуха будет постоянной и равной 79 %.

Тогда при отсутствии химического недожога ($CO=0$, $H_2=0$, $CH_4=0$) азотная формула может быть преобразована в **кислородную формулу**:

$$\beta = \frac{1}{1 - \frac{79}{21} \cdot \frac{O_2}{79}} = \frac{21}{21 - O_2}.$$

Пусть горючая часть топлива представлена только водородом. Тогда в продуктах полного сгорания будут содержаться только азот, кислород и водяной пар, а в сухих продуктах сгорания (газоанализаторы работают при комнатной температуре) – только азот и кислород. Совершенно очевидно, что при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1$ концентрация азота в продуктах сгорания будет равна 100 %. Таким образом, наличие в топливе водорода приводит к увеличению концентрации азота в сухих продуктах сгорания.

На изменение концентрации азота в продуктах сгорания влияет также и содержание кислорода в топливе. При соотношении водорода топлива и кислорода топлива $4/32 = 1/8$ ($2\text{H}_2 + \text{O}_2 = 2\text{H}_2\text{O}$, $4 + 32 = 36$) весь кислород топлива затрачивается на окисление водорода топлива, а кислород воздуха, соответственно, будет расходоваться на окисление углерода и серы. В этом случае концентрация азота в продуктах сгорания при любом избытке воздуха будет также постоянной и равной 79 %. Следовательно, кислородная формула даёт достаточно точные значения либо когда содержание водорода в топливе незначительно, либо когда выполняется соотношение $\text{H}^{\text{r}}/\text{O}^{\text{r}} \approx 1/8$ (например, при сжигании древесины).

Вторым достаточно широко применяемым методом определения избытка воздуха в продуктах сгорания является его расчёт на основе нахождения процентного содержания сухих трехатомных газов

$$\text{RO}_2 = \text{CO}_2 + \text{SO}_2,$$

где
$$\text{RO}_2 = \frac{V_{\text{RO}_2}}{V_{\text{с.г}}} \cdot 100, \%$$

При полном сгорании топлива в стехиометрических соотношениях ($\alpha=1$) и при условии, что содержание водорода и кислорода в топливе соответствует выражению $\text{H}^{\text{r}}=\text{O}^{\text{r}}/8$ (весь водород топлива окисляется кислородом топлива), содержание сухих трёхатомных газов составит:

$$\text{RO}_2^{\text{o}} = \frac{V_{\text{RO}_2}}{V_{\text{с.г}}} \cdot 100 = 21 \%$$

В большинстве твердых и жидких топливах $\text{H}^{\text{r}} > \text{O}^{\text{r}}/8$. Тогда остаток водорода будет окисляться за счет кислорода воздуха с образованием паров воды. Остающийся при этом объём азота ΔV_{N_2} войдет в состав сухих газов, и максимальное содержание сухих трехатомных газов будет меньше 21 %:

$$\text{RO}_2^{\text{max}} = \frac{V_{\text{RO}_2}}{V'_{\text{с.г}} + \Delta V_{\text{N}_2}} 100 = \frac{V_{\text{RO}_2}}{V_{\text{с.г}}^{\text{o}}} 100, \%$$

и тем меньше, чем больше разность H^r и $O^r/8$.

Показателем, отражающим это различие в содержании водорода и кислорода в топливе, является **топливный коэффициент Бунте β** . Его значение для твердых и жидких топлив определяется по формуле:

$$\beta = 2,35 \cdot \frac{H^r - \frac{O^r}{8}}{C^r + 0,375 \cdot S^r}.$$

С помощью коэффициента β величину максимально возможного содержания сухих трехатомных газов в продуктах сгорания $RO_2^{\max}$ можно выразить следующим образом:

$$RO_2^{\max} = \frac{21}{1 + \beta}.$$

Значения $RO_2^{\max}$ находятся в следующих пределах для различных видов топлив, %:

твердое топливо.....	18÷20;
мазут.....	16÷17;
природный газ.....	11÷13.

При коэффициенте избытка воздуха $\alpha > 1$ объём сухих газов составит

$$V_{c.g} = V_{c.g}^o + \Delta V,$$

а содержание трёхатомных газов будет меньше, чем $RO_2^{\max}$:

$$RO_2 = \frac{V_{RO_2}}{V_{c.g} + \Delta V} \cdot 100, \%$$

Поскольку при этом объём V_{RO_2} не изменится, то

$$\frac{RO_2^{\max}}{RO_2} = \frac{V_{c.g}^o + \Delta V}{V_{c.g}^o} \cong \frac{V}{V^o} = \alpha.$$

Надежность этого метода определения коэффициента избытка воздуха зависит от того, насколько точно известно для данного топлива значение $RO_2^{\max}$, а также от точности выполнения анализа дымовых газов на содержание RO_2 . Трудности использования данного метода возникают при сжигании топлива, минеральная часть которого содержит карбонаты, выделяющие при термическом разложении дополнительное количество CO_2 .

Резюмируя всё вышеизложенное, можно отметить следующие формулы для определения коэффициента избытка воздуха по результатам газового анализа:

- **азотная формула:**

$$\alpha = \frac{1}{1 - \frac{79}{21} \frac{O_2 - 0,5(CO + H_2) - 2CH_4}{N_2}}; \quad (7)$$

- **кислородная формула:**

$$\alpha = \frac{21}{21 - O_2}; \quad (8)$$

- **по содержанию сухих трехатомных газов в продуктах сгорания:**

$$\alpha = \frac{RO_2^{\max}}{RO_2}, \quad (9)$$

где $RO_2^{\max} = \frac{21}{1 + \beta}; \quad \beta = 2,35 \frac{H^r - O^r / 8}{C^r + 0,375S^r}.$

5. Тепловой баланс процесса горения

Эффективность использования топлива в топочном устройстве определяется двумя основными факторами: полнотой сгорания топлива в топочной камере и глубиной охлаждения продуктов сгорания.

Распределение вносимой в топку теплоты на полезно используемую и тепловые потери производится путем составления теплового баланса. Тепловой баланс составляется на 1 кг твердого или жидкого топлива либо на 1 м³ газообразного топлива.

Располагаемая теплота:

$$Q_p = Q_i^r + i_{\text{тл}} + Q_{\text{ф}} + Q_{\text{в.вн}}, \text{ кДж/кг (кДж/м}^3\text{)},$$

где Q_i^r – низшая теплота сгорания рабочей массы топлива; $i_{\text{тл}}$ – физическая теплота топлива; $Q_{\text{ф}}$ – теплота, вносимая в топку с паровым дутьем или при паровом распылении мазута; $Q_{\text{в.вн}}$ – теплота, внесенная в топку воздухом при его подогреве вне котла.

Для большей части достаточно сухих и малосернистых твёрдых топлив принимается $Q_p = Q_i^r$, а для газового топлива – $Q_p = Q_i^d$.

Для твёрдых топлив с высоким содержанием влаги и жидких топлив учитывается физическая теплота топлива $i_{\text{тл}}$, которая зависит от температуры и теплоёмкости поступающего на горение топлива:

$$i_{\text{тл}} = c_{\text{тл}} t_{\text{тл}},$$

где $c_{\text{тл}}$ – удельная теплоемкость топлива, кДж/(кг·°C); $t_{\text{тл}}$ – температура топлива, °C.

В летний период времени температура топлива принимается равной $t_{\text{тл}} = 20$ °C, а теплоёмкость топлива определяется по формуле:

$$c_{\text{тл}} = 0,042 W_t^r + c_{\text{тл}}^d (1 - 0,01 W_t^r), \text{ кДж/(кг} \cdot \text{°C)}.$$

Теплоёмкость сухой массы топлива $c_{\text{тл}}^d$ составляет:

- для бурых углей – $1,13 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$;
- для каменных углей – $1,09 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$;
- для углей А, ПА, Т – $0,92 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$.

В зимний период принимается $t_{\text{тл}} = 0^\circ\text{C}$, и физическая теплота топлива не учитывается.

Температура мазута для обеспечения тонкого распыла в форсунках котельного агрегата должна быть достаточно высокой. Обычно она составляет $t_{\text{тл}} = 90 \div 140^\circ\text{C}$.

Теплоёмкость мазута $c_{\text{тл}} = 1,74 + 0,0025 t_{\text{тл}}$, $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$.

При распылении мазута с помощью паромеханических форсунок в топку котельного агрегата вместе с разогретым мазутом поступает пар, который вносит в топку дополнительную теплоту $Q_{\text{ф}}$, определяемую по формуле:

$$Q_{\text{ф}} = G_{\text{ф}} (i_{\text{ф}} - 2380), \text{ кДж/кг},$$

где $G_{\text{ф}}$ – удельный расход пара на 1 кг мазута, кг пара/кг мазута; $i_{\text{ф}}$ – энтальпия пара, поступающего в форсунку, кДж/кг.

Параметры пара, поступающего на распыл мазута: $P = 0,3 \div 0,6 \text{ МПа}$, $t = 280 \div 350^\circ\text{C}$, удельный расход пара $G_{\text{ф}} = 0,03 \div 0,05 \text{ кг пара/кг мазута}$.

В случае предварительного (внешнего) подогрева воздуха в калориферах перед его поступлением в воздухоподогреватель котельного агрегата, теплота такого подогрева $Q_{\text{в.вн}}$ включается в располагаемую теплоту топлива и рассчитывается по формуле:

$$Q_{\text{в.вн}} = \beta_{\text{в}} (I_{\text{в}}^{\circ'} - I_{\text{хв}}^{\circ}),$$

где $\beta_{\text{в}}$ – отношение количества предварительно подогретого воздуха к теоретически необходимому; $I_{\text{хв}}^{\circ}$ – энтальпия теоретического объёма

холодного воздуха; I'_B – энтальпия теоретического объема воздуха на входе в воздухоподогреватель.

Располагаемая теплота Q_p расходуется на производство полезной теплоты Q_1 и тепловые потери на 1 кг твердого или жидкого топлива либо на 1 м³ газообразного топлива:

$$Q_p = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6, \quad (10)$$

где Q_1 – полезно используемая теплота; Q_2 – потери теплоты с уходящими газами; Q_3 – потери теплоты с химической неполнотой сгорания топлива; Q_4 – потери теплоты с механической неполнотой сгорания; Q_5 – потери теплоты в окружающую среду через обмуровку; Q_6 – потери с физической теплотой шлака.

Разделив правую и левую части формулы (10) на Q_p и умножив на 100 %, получим уравнения теплового баланса в следующем виде:

$$q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 = 100 \%,$$

где q_1 – доля полезно использованной теплоты, %, $q_2 - q_6$ – потери теплоты, выраженные в %.

Коэффициент полезного действия котла:

$$\eta_{ка} = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6) = 100 - \sum_{i=1}^n q_i.$$

Большая часть теплоты, вносимой в топку, воспринимается поверхностями нагрева и передается рабочему телу. За счет этой теплоты производится подогрев воды до температуры кипения, ее испарение и перегрев пара. Это полезно используемая теплота. Остальная часть составляет тепловые потери.

Полное количество теплоты, полезно использованной в котле:

- для водогрейного котла

$$Q_1 = D_{\text{в}}(i''_{\text{в}} - i'_{\text{в}}), \text{ кВт},$$

где $D_{\text{в}}$ – расход воды через котел, кг/с; $i'_{\text{в}}$, $i''_{\text{в}}$ – энтальпия воды на входе и на выходе из котла, кДж/кг;

- для парового котла

$$Q_1 = D_{\text{пе}}(\dot{i}_{\text{пе}} - \dot{i}_{\text{пв}}) + D_{\text{пр}}(\dot{i}_{\text{кип}} - \dot{i}_{\text{пв}}), \text{ кВт},$$

где $D_{\text{пе}}$ – расход перегретого пара, кг/с; $D_{\text{пр}}$ – расход продувочной воды, кг/с; $\dot{i}_{\text{пе}}$ – энтальпия перегретого пара, кДж/кг; $\dot{i}_{\text{пв}}$ – энтальпия питательной воды, кДж/кг; $\dot{i}_{\text{кип}}$ – энтальпия кипящей воды, кДж/кг.

Наибольшими из потерь в котельном агрегате, как правило, являются **потери теплоты с уходящими газами:**

$$q_2 = \frac{I_{\text{ух}} - \alpha_{\text{ух}} I_{\text{х.в}}^0}{Q_{\text{р}}} (100 - q_4), \%,$$

где $I_{\text{ух}}$ и $I_{\text{х.в}}^0$ – соответственно, энтальпия уходящих газов и теоретического количества холодного воздуха; $\alpha_{\text{ух}}$ – коэффициент избытка воздуха в уходящих газах.

В продуктах сгорания топлива могут находиться газообразные горючие компоненты CO , H_2 , CH_4 (продукты химического недожога), догорание которых за пределами топочной камеры вследствие низких температур практически невозможно.

Химическая неполнота сгорания топлива может являться следствием:

- общего (или местного) недостатка воздуха ($\alpha_{\text{т}}$);
- плохого смесеобразования (способ сжигания топлива, конструкция горелочного устройства);

- низких или высоких значений теплонапряжения топочного объема

$q_v = B_p Q_i^r / V_m$ (в первом случае – низкая температура в топке; во втором – уменьшение времени пребывания газов в объеме топки и невозможность в связи с этим завершения реакции горения).

Потери теплоты с химическим недожогом зависят от вида топлива, способа его сжигания, конструкции горелок, аэродинамики камеры сгорания и принимаются на основании опыта эксплуатации котельных агрегатов.

Потери теплоты с химическим недожогом определяются суммарной теплотой сгорания продуктов неполного окисления горючей массы топлива:

$$q_3 = \frac{V_{\text{сг}} (126,4 \text{ CO} + 358,8 \text{ CH}_4 + 107,9 \text{ H}_2)}{Q_p} 100, \%,$$

где CO, CH₄, H₂ – объёмные концентрации продуктов неполного сгорания топлива в сухих продуктах сгорания, %; V_{сг} – объем сухих продуктов сгорания, м³/кг.

Потери теплоты с химическим недожогом зависят от коэффициента избытка воздуха (рис. 2) и нагрузки топочного устройства (рис. 3).

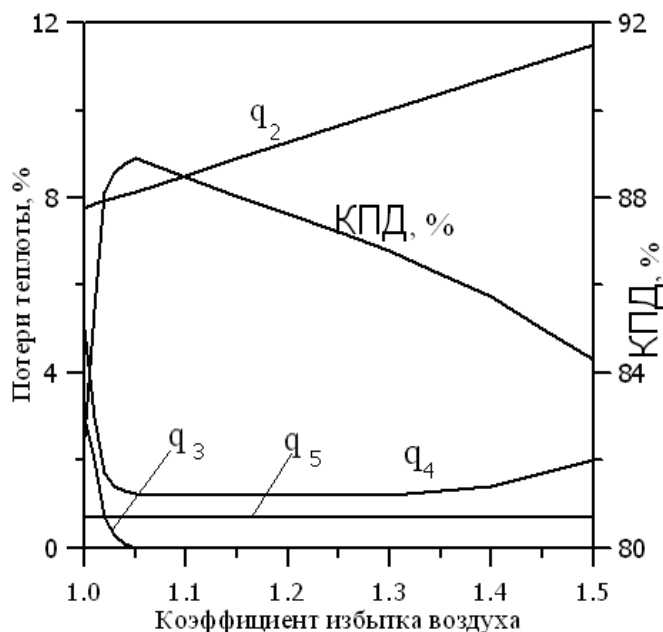


Рис. 2. Зависимость потерь теплоты и КПД от коэффициента избытка воздуха

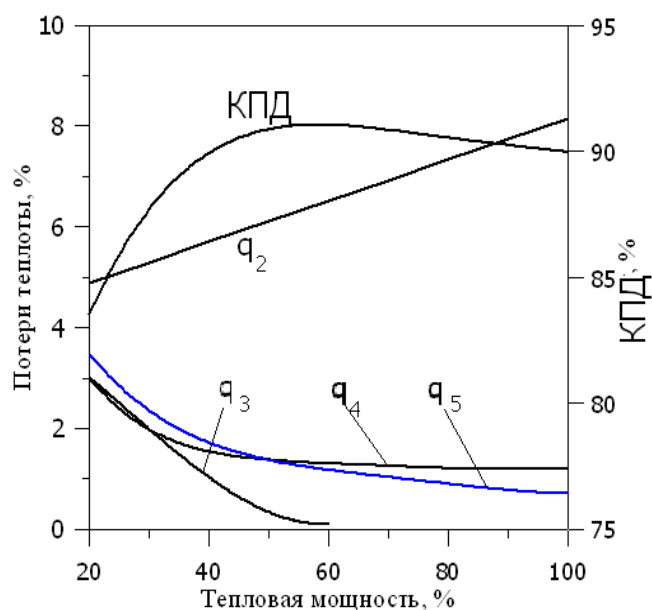


Рис. 3. Зависимость потерь теплоты и КПД от тепловой мощности котла

Наличие химического недожога при $\alpha = 1$ определяется несовершенством аэродинамики современных горелочных устройств и камер сгорания, не позволяющих достичь идеального (на молекулярном уровне) перемешивания топлива с воздухом. При коэффициенте избытка воздуха $\alpha_{кр}$ (кривая q_3) химический недожог не возникает. Обычно $\alpha_{кр} = 1,02 \div 1,03$, что и характеризует степень аэродинамического несовершенства горелочного устройства.

Механический недожог при сжигании твёрдых топлив (торфа, углей, сланцев) представляет собой коксовые частицы, которые покидают зону высоких температур, не успев полностью догореть. Механический недожог при сжигании газа и мазута может иметь место также в виде твердых частиц или сажи, возникающих в высокотемпературной зоне при недостатке кислорода. В нормальных условиях эксплуатации потери с механическим недожогом при сжигании твердых топлив составляют $q_4 = 0,5 \div 5 \%$. При сжигании газа и мазута потери с мехнедожогом невелики (как правило, менее 1 %).

При камерном сжигании твердого топлива потери теплоты с механической неполнотой сгорания q_4 подразделяются на потери с уносом $q_4^{ун}$ и со шлаком $q_4^{шл}$, при этом преобладающую часть составляет $q_4^{ун}$.

Потери q_4 существенно зависят от коэффициента избытка воздуха. При избытке воздуха ниже оптимального недожог определяется неполнотой перемешивания топлива с воздухом на выходе из горелки и развитием зон с недостатком кислорода, хотя температурный уровень достаточно высок.

При $\alpha > \alpha_{опт}$ наблюдается снижение температуры в зоне горения и замедление реакций окисления. Одновременно уменьшается время пребывания частиц в высокотемпературной зоне ввиду увеличения объема продуктов сгорания.

Повышенные потери q_4 у низкорреакционных топлив определяются поздним воспламенением коксовых частиц и затянутым горением в кинетической области, в связи с этим низкорреакционные топлива весьма чувствительны к режиму эксплуатации.

Потери теплоты с механической неполнотой сгорания рассчитываются по формуле:

$$q_4 = \left(a_{шл} \frac{\Gamma_{шл}}{100 - \Gamma_{шл}} + a_{ун} \frac{\Gamma_{ун}}{100 - \Gamma_{ун}} \right) \frac{32,7 A^r}{Q_p}, \%,$$

где $a_{шл}$ и $a_{ун}$ – соответственно, доли золы в шлаке и в уносе; $\Gamma_{шл}$ и $\Gamma_{ун}$ – содержание горючих в шлаке и уносе, %; 32,7 – теплота сгорания коксовых частиц в шлаке и уносе, МДж/кг.

Значение **потерь теплоты в окружающую среду** от наружного охлаждения q_5 составляет от 0,2 до 2,5 %.

Потери теплоты с физической теплотой шлака определяются по формуле:

$$q_6 = \frac{A^r a_{шл} (ct)_{зл}}{Q_p}, \%,$$

где $(ct)_{\text{зл}}$ – произведение температуры и теплоёмкости шлака.

При снижении тепловой нагрузки котла происходит некоторое падение температуры уходящих газов, что приводит к уменьшению потерь теплоты с уходящими газами (см. рис. 3). Потери теплоты с химическим и механическим недожогом увеличиваются с уменьшением тепловой нагрузки из-за ухудшения процесса смешения топлива и воздуха при пониженных скоростях. Удельные потери теплоты через обмуровку также увеличиваются, поскольку абсолютное значение этих потерь теплоты остается практически неизменным, а тепловая нагрузка уменьшается. Таким образом, из-за различной зависимости тепловых потерь от нагрузки оказывается, что при пониженной нагрузке КПД котельного агрегата достигает максимального значения (см. рис.3).

Расход топлива B , подаваемого в топочную камеру котельного агрегата, можно определить из баланса между располагаемой и полезной теплотой:

$$B = \frac{Q_1 \cdot 100}{Q_p \cdot \eta_{ка}}, \text{ кг/с или м}^3/\text{с}.$$

Расчетный расход топлива с учетом механической неполноты сгорания:

$$B_p = \frac{B(100 - q_4)}{100}, \text{ кг/с}.$$

Коэффициент полезного действия котла (брутто) по прямому балансу:

$$\eta_{ка} = \frac{Q_1}{Q_p B} \cdot 100, \%$$

6. Способы сжигания топлива

В теплоэнергетических установках топливо сжигается либо **в слое**, либо **в объёме** топочной камеры (камеры сгорания). В слое может сжигаться только твёрдое топливо, в объёме – газ, мазут и твёрдое топливо в пылевидном состоянии.

На рис.4 представлены разновидности способов сжигания.

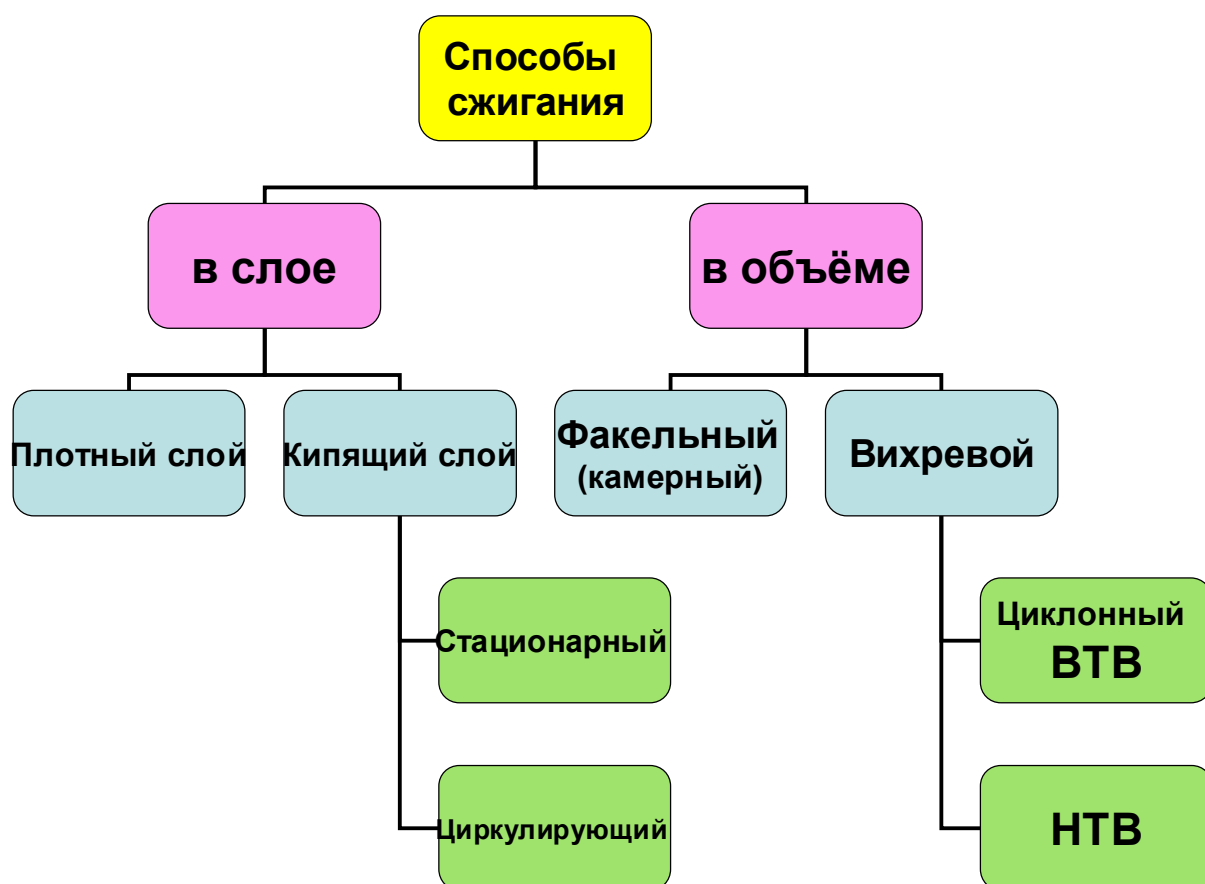


Рис.4. Способы сжигания топлива

6.1. Слоеое сжигание

При **сжигании в плотном слое** (рис.5) твёрдое топливо, загруженное слоем определённой толщины (высоты) на распределительную

колосниковую решётку, поджигается и продувается (как правило, снизу вверх) воздухом. Основное горение происходит в слое, образованном кусками топлива. Над слоем в объёме топочной камеры горят летучие вещества, выделяющиеся из топлива в процессе его прогрева (H_2 , CO , CH_4 и др.), а также догорают мелкие частицы, выносимые из слоя потоком воздуха и продуктов сгорания. Скорость газозвдушного потока в слое ограничивается пределом устойчивости его залегания. Увеличение скорости воздуха (а, следовательно, и скорости дымовых газов) сверх определённого предела вызывает взрыхление слоя, так как воздух, прорывающийся через слой в отдельных местах, образует кратеры. Поскольку в слой всегда загружается полидисперсное топливо, то это приводит к выносу большого количества более мелких частиц топлива, которые не успевают догореть в объёме топки, что вызывает увеличение потерь теплоты с механическим недожогом q_4 .

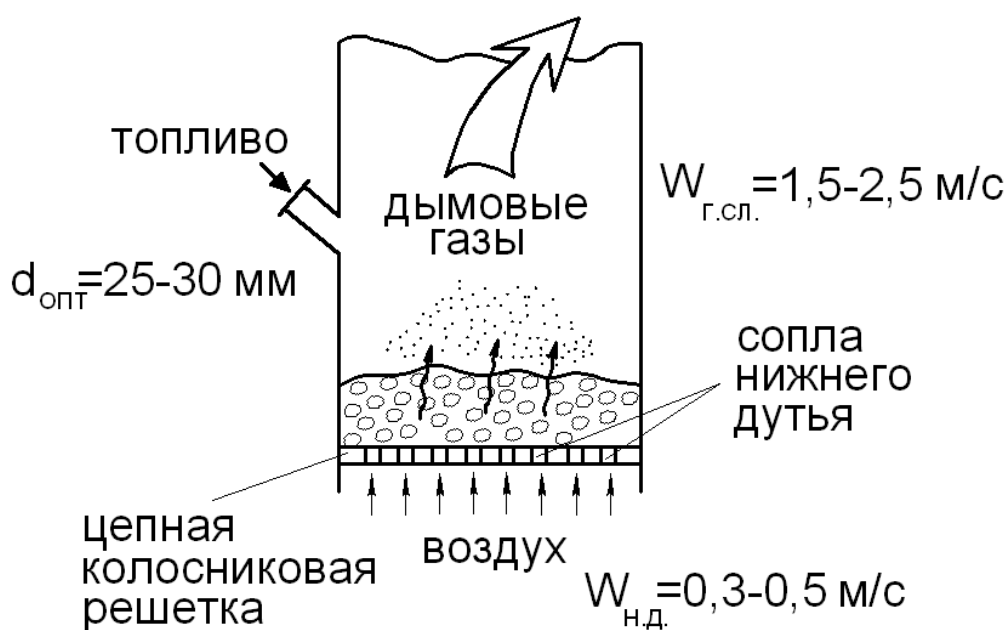


Рис. 5. Сжигание в плотном слое

Зона, в пределах которой практически полностью расходуется кислород воздуха, подаваемого под слой, называется **кислородной** (рис.6): её высота составляет два-три диаметра кусков топлива $h_{\text{кисл}} = (2 \div 4) \delta_{\text{к}}$.

Если высота слоя превышает высоту кислородной зоны, то за кислородной следует **восстановительная зона**, в которой протекают реакции восстановления CO_2 и H_2O на поверхности углеродных (коксовых) частиц: $\text{CO}_2 + \text{C} = 2\text{CO}$ и $\text{H}_2\text{O} + \text{C} = \text{CO} + \text{H}_2$.

В этом случае в состав дымовых газов, наряду с CO_2 , H_2O и N_2 , входят и горючие газы CO и H_2 , образовавшиеся не только в процессе выхода летучих, но и в результате восстановительных реакций CO_2 и H_2O , причём их концентрация возрастает по мере увеличения высоты восстановительной зоны.

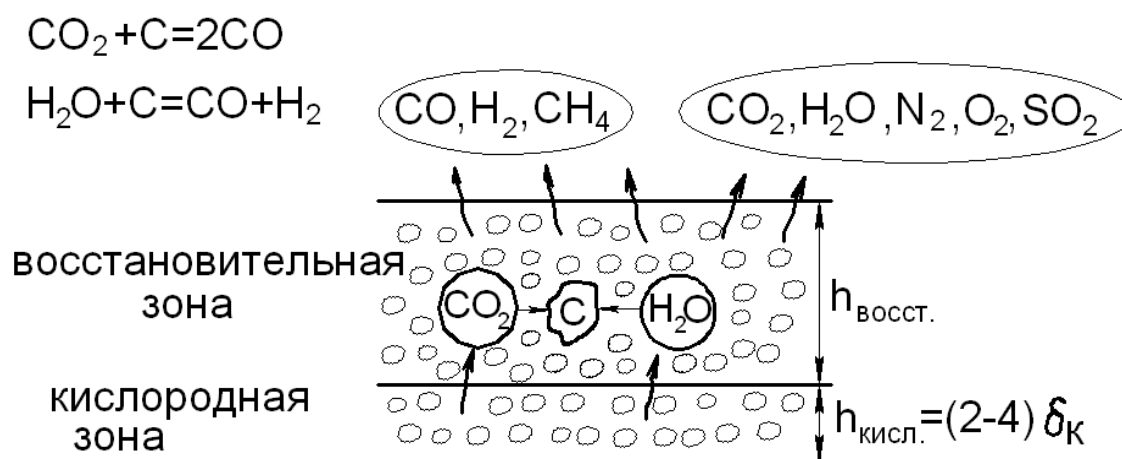


Рис. 6. Слой топлива

В слоевых топках высоту слоя следует поддерживать либо равной высоте кислородной зоны, либо несколько большей её. Для дожигания выносимой из слоя в топочный объём мелкодисперсной угольной пыли и продуктов неполного сгорания (H_2 , CO) осуществляется подача дополнительного воздуха над слоем топлива.

Топочные устройства для слоевого сжигания классифицируются в зависимости от способа подачи топлива, перемещения и шуровки слоя топлива на колосниковой решётке. Шуровка слоя необходима для удаления шлака и разрушения спеков (при сжигании спекающихся углей). В немеханизированных топках, где все три операции осуществляются вручную, можно сжигать не более 400 кг/ч угля.

В промышленной теплоэнергетике большее распространение получили слоевые топки с пневмомеханическими забрасывателями и цепной решёткой обратного хода (рис.7).

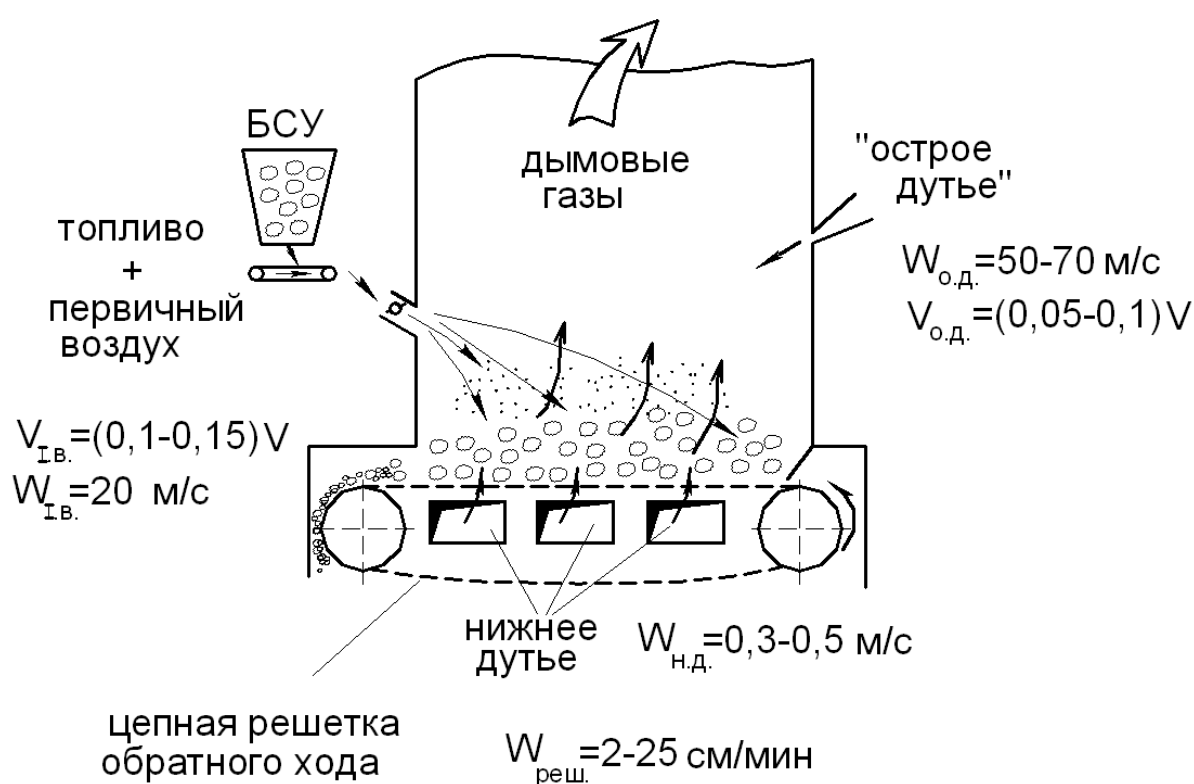


Рис. 7. Полумеханическая топка обратного хода

Топливо подаётся из бункера сырого угля ленточным питателем на лопасти ротора пневмомеханического забрасывателя и далее в топку на непрерывно движущуюся со скоростью от 2 до 25 см/мин колосниковую решётку, сконструированную в виде полотна транспортёрной ленты. Полотно решётки состоит из отдельных колосниковых элементов, закреплённых на бесконечных шарнирных цепях, приводимых в движение

“звёздочками”. Воздух для горения подаётся специальными соплами через зазоры между элементами колосников. По законам инерции более крупные куски летят к задней стенке, и время их пребывания на решётке, а, следовательно, и время горения, больше. Самые мелкие фракции (размер частиц меньше 1 мм) сгорают в топочном объёме на лету, для чего специально подаётся воздух (10÷15 % от общего расхода) со скоростью порядка 20 м/с.

Для интенсификации горения в топочном объёме через сопла, расположенные в задней стенке, дополнительно подаётся воздух (5÷10 % от общего расхода) в виде струй “**острого дутья**” со скоростью 50÷70 м/с. Как правило, вместе с “острым дутьём” в топку возвращается уловленный в золоуловителе унос с относительно высоким содержанием горючих веществ, что снижает потери теплоты с механическим недожогом. При отсутствии острого дутья и возврата уноса q_4 может превышать 10 %.

Описанная топка, по сути, является **факельно-слоевой**, поскольку часть топлива сгорает в факеле.

Оптимальный размер кусков угля для слоевых топок составляет $\delta_{\text{опт}} = 25 \div 50$ мм. Для такого фракционного состава топлива оптимальная скорость газов в слое (с точки зрения устойчивости залегания слоя) $W_r = 1,5 \div 2,5$ м/с, что соответствует скорости нижнего дутья $W_{\text{нд}} = 0,3 \div 0,5$ м/с.

Преимущества слоевых топок являются:

- простота эксплуатации;
- отсутствие углеразмалывающих устройств (систем пылеприготовления);
- возможность устойчивой (без погасаний) эксплуатации в широком диапазоне нагрузок.

К **недостаткам** слоевого способа сжигания следует отнести:

- ограниченная производительность,

- повышенные потери тепла с механическим недожогом q_4 и с уходящими газами q_2 (из-за необходимости поддерживать высокий коэффициент избытка воздуха $\alpha=1,3\div 1,4$ и выше) и, как следствие, низкий КПД;
- возможность сжигать только твёрдое топливо;
- проблематичность (невозможность) сжигания топлива с очень высокой зольностью и влажностью.

6.2. Факельное сжигание

В основу **факельных (камерных) топок** положен принцип, при котором топливо вдувается в топку (камеру сгорания) через горелки вместе с необходимым для горения воздухом (рис.8).

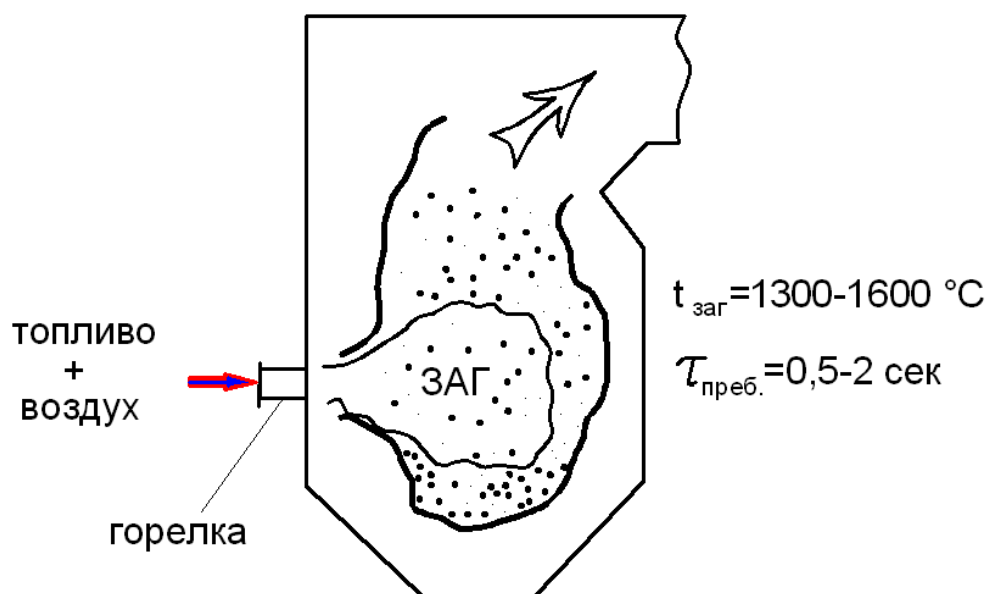


Рис.8. Факельный способ сжигания

Топливо непрерывно транспортируется через топочную камеру потоком воздуха и продуктов сгорания. На пути от входа (выход из горелки) до выхода из топки совершается процесс горения с образованием факела горящего топлива, заполняющего объём топочной камеры. Температура в

зоне активного горения (ЗАГ) порядка $1300 \div 1500$ °С. Продолжительность пребывания частиц топлива в зоне активного горения от 0,5 до 2 с. Для обеспечения полного выгорания топлива за такое короткое время твёрдое топливо перед поступлением в топку предварительно подсушивают и тщательно размалывают до пылевидного состояния, а жидкое – распыляют с помощью форсунок до мельчайших капель.

Твёрдое топливо измельчается в мельничных устройствах и вдувается в топочную камеру через **пылеугольные горелки** (рис.9). Конструкции горелок чрезвычайно разнообразны, так как диапазон изменения теплотехнических характеристик углей очень велик. Например, выход летучих, в значительной степени определяющий реакционные качества топлива, меняется от 2 % у метаантрацита до 92 % у эстонского сланца. Тем не менее, практически во всех пылеугольных горелках определённая часть воздуха, предназначенная для подсушки и транспортировки угольной пыли к горелке, смешивается с топливом до поступления в топку (**первичный воздух**), а оставшаяся часть (**вторичный воздух**) смешивается с аэросмесью уже после выхода из горелки, т.е. в топочном объёме.

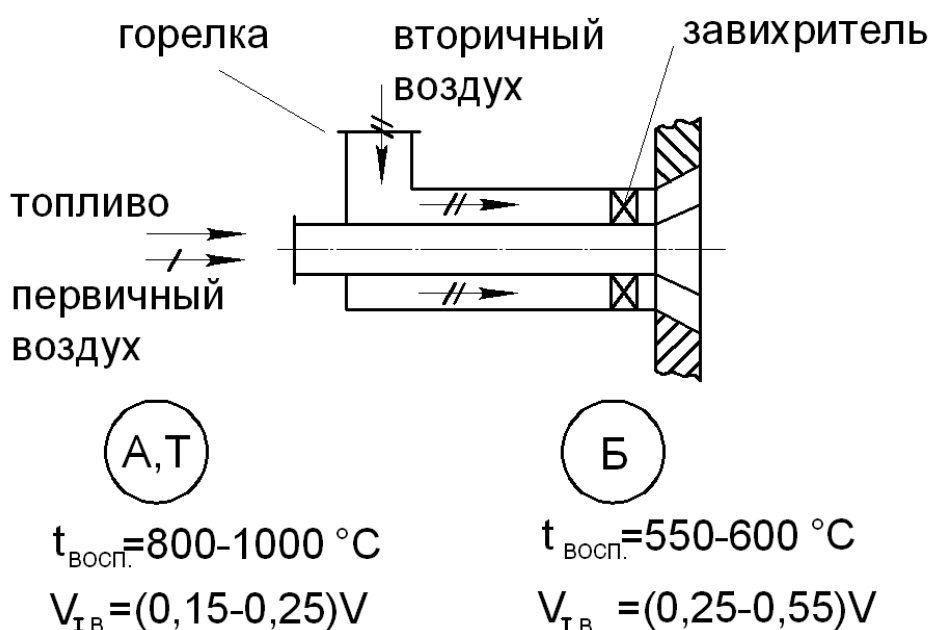


Рис. 9. Вихревая пылеугольная горелка

При камерном сжигании угольной пыли летучие вещества, выделяющиеся в процессе её прогрева и термического разложения, сгорают в факеле, образуя с воздухом гомогенную смесь, что способствует разогреву твёрдых частиц (кокса) до температуры воспламенения, а также стабилизирует факел. Первичный воздух должен обеспечить сжигание летучих, поэтому его количество V_{IV} (доля от общего объёма воздуха) определяется выходом летучих веществ. Для углей с малым выходом летучих (например, антрацита или тощего угля, температура воспламенения которых от 800 до 1000 °C) доля первичного воздуха $V_{IV} = (0,15 \div 0,25) \cdot V$, а для топлив с высоким выходом летучих (бурых углей с температурой воспламенения от 550 до 600 °C) $V_{IV} = (0,2 \div 0,55) \cdot V$.

Остальной необходимый для горения воздух (вторичный воздух), как уже было отмечено, подаётся в топку по отдельному каналу и смешивается с угольной пылью уже в процессе горения непосредственно в топочном объёме.

При сгорании летучих расходуется, главным образом, кислород первичного воздуха. Горение летучих ускоряет прогрев коксовых частиц и их воспламенение. Горение же коксовых частиц происходит, в основном, за счёт кислорода вторичного воздуха.

Изложенная схема факельного способа сжигания угольной пыли, безусловно, является упрощённой, так как в реальных условиях сжигается полидисперсная пыль. Поэтому стадии выхода летучих и горения коксового остатка протекают последовательно только для каждой отдельной частицы (или отдельной фракции). А для всего факела, в целом, эти процессы протекают параллельно, поскольку мелкие частицы (размером в несколько микрометров) прогреваются, воспламеняются и сгорают значительно быстрее, чем крупные частицы. При факельном сжигании максимальный размер частиц может достигать: для каменных углей — нескольких сотен микрометров, для бурых углей, сланцев и торфа — нескольких миллиметров.

6.2.1. Расположение горелок на стенках топочной камеры

Интенсивность процессов горения, тепло- и массообмена, а следовательно, и условия надёжной эксплуатации топочной камеры определяются не только конструкцией горелок и режимными параметрами, но и схемой размещения горелок на стенках топки. Наибольшее распространение для обычных однокамерных топок получили **фронтальное, встречное** и **угловое** расположение горелок (рис. 10).

Рис.10. Схемы расположения горелок в топочной камере:

а – фронтальное, *б* – встречное, *в* – угловое

При **фронтальном** расположении горелок (рис.10*а*) струи, истекающие из отдельных горелок, первоначально развиваются самостоятельно, а затем сливаются в единый поток. По мере распространения струя подсасывает (эжектирует) топочные газы, масса её значительно увеличивается, а концентрация окислителя снижается. Во избежание касания струёй противоположной (задней) стенки топочной камеры при фронтальном расположении целесообразно использование **вихревых горелок**, которые дают относительно короткий факел.

При **встречном** расположении (рис.10*б*) горелки устанавливаются либо на противоположных боковых стенках, либо на фронтальной и задней,

причём возможна как **встречно-лобовая**, так и **встречно-смещённая** компоновка.

На рис.11 представлены модельные снимки свободно распространяющегося пламени вихревой осесимметричной горелки при различных углах крутки вторичного воздуха в сравнении с пламенем незакрученного параллельноструйного потока.

При **встречно-лобовой** компоновке в топке получается концентрированный удар встречных потоков, в результате чего поток разделяется на два направления: одна часть потока поднимается в верхнюю половину топки, а другая опускается вниз. При неравенстве импульсов встречных потоков возникает асимметричность течения, и результирующий факел может приблизиться к одной из стен.

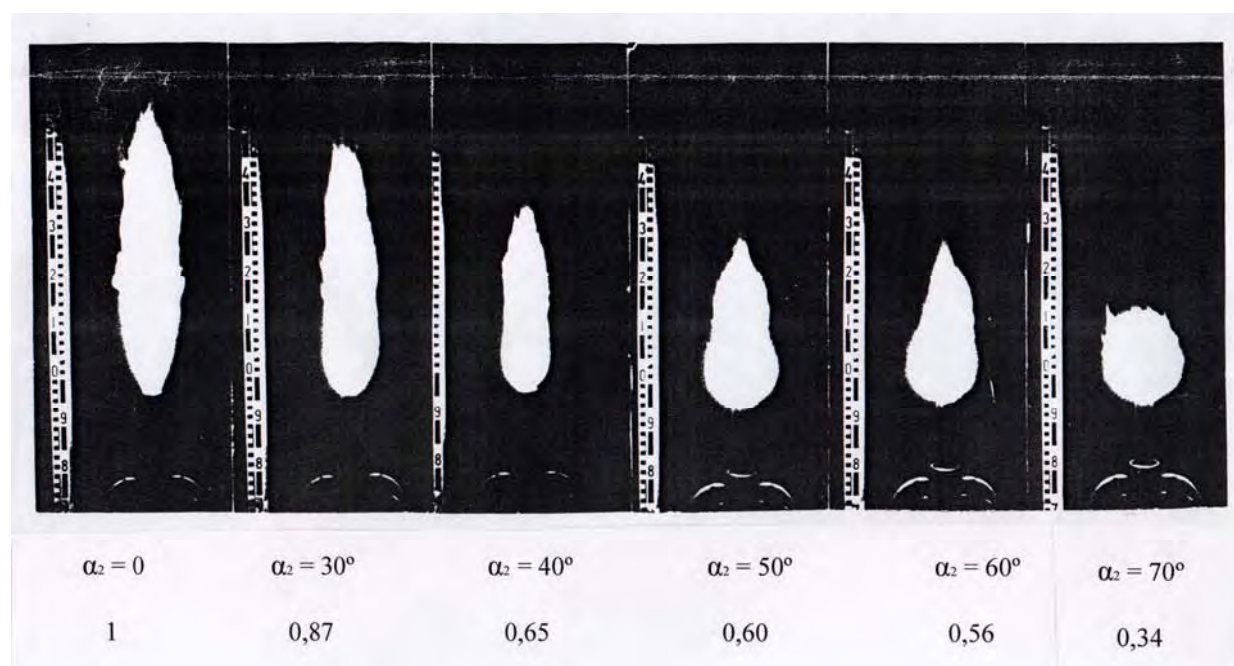


Рис.11. Длина газового факела вихревой горелки $L_{\text{вихр}}$ при различных углах крутки вторичного воздуха α_2 в сравнении с прямоточным факелом $L_{\text{пр}}$

При **встречно-смещённой** компоновке горелок потоки взаимно проникают друг в друга, при этом происходит лучшее заполнение факелом топочного объёма, выравнивается поле температур, обеспечивается

интенсивный подвод теплоты к корню факела, стабилизируется воспламенение.

При **угловом** расположении горелок (рис.10в) возможны следующие схемы их установки (рис.12): **диагональная, блочная, тангенциальная**. Подобные компоновки также имеют ряд преимуществ, аналогичных встречно-смещённой компоновке.

Рис.12. Схемы угловой установки горелок

а – диагональная; *б, в* – блочная; *г, д* – тангенциальная

Ещё более интенсифицируются процессы тепло- и массопереноса за счёт дополнительной турбулизации (крутки) потоков с помощью **вихревых горелок**, однако при несоответствии импульсов возможно искажение аэродинамики результирующего потока и, как следствие, неравномерность тепловосприятия по горизонтальному сечению топочной камеры.

Применение **вихревых горелок** кардинально изменяет аэродинамику истекающих потоков: профиль скорости, скорость вдоль оси струи, угол раскрытия струи, эжектирующую способность струи, – по сравнению с прямоточными горелками (рис.13).

При незначительной крутке на оси струи уменьшается статическое давление. Струя распространяется под действием центробежных сил, вызванных движением вращающихся частиц потока. До тех пор, пока между

силами сжатия и центробежными силами сохраняется равновесие, профиль осевой составляющей скорости подобен случаю распространения свободной незакрученной струи (рис.13, кривая а).

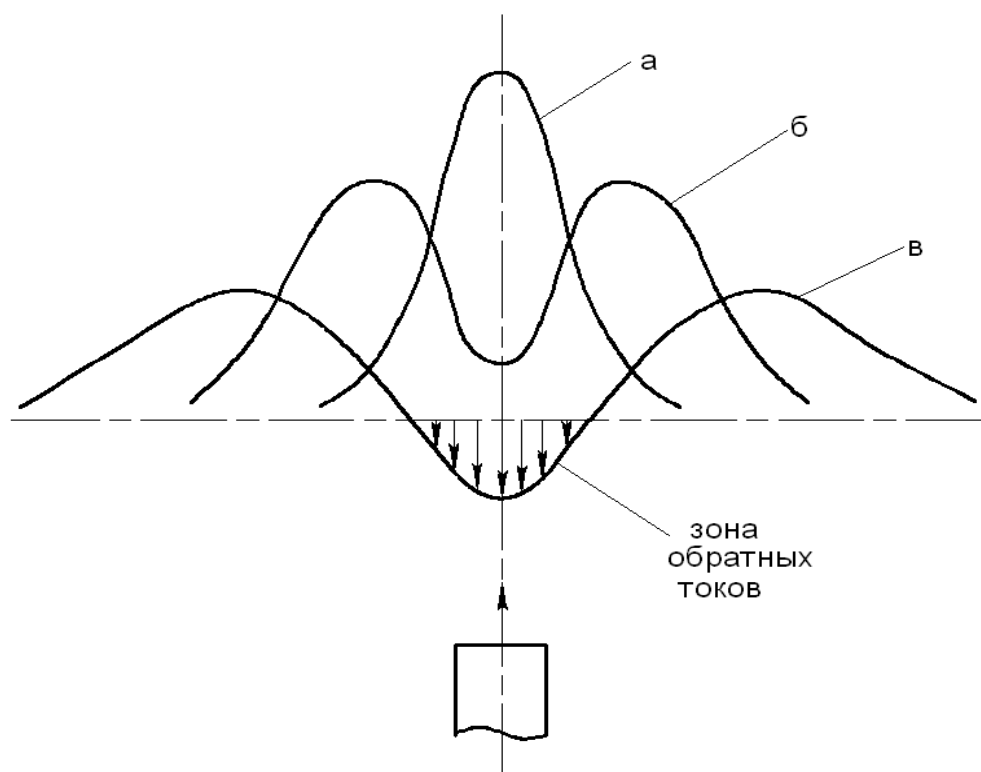


Рис.13. Изменение профиля осевой составляющей скорости
в окологорелочной области:

а – незакрученная струя; б – слабозакрученная струя;
в – сильнозакрученная струя (сверхкритическая крутка)

При усилении крутки потока силы сжатия компенсируют часть импульса осевого потока и тем самым замедляют его. Поскольку максимальное падение давления происходит на оси струи, наибольшее торможение осевого потока имеет место также на оси. При дальнейшем повышении степени крутки образуется профиль скорости со впадиной посередине (рис.13, кривая б).

Последующее увеличение крутки приведёт к тому, что силы сжатия превысят осевой импульс потока вблизи оси и вынудят повернуть осевой поток в обратном направлении (рис.13, кривая в).

Образующийся в **окологорелочной** области **обратный вихрь** играет важнейшую роль, в первую очередь, при стабилизации вихревого пламени, поскольку за счёт эффекта **внутренней рециркуляции** (рис.14) происходит подсос горячих дымовых газов в корень факела, в отличие от прямоточных горелок, которые эжектируют горячие газы только с внешней (периферийной) поверхности.

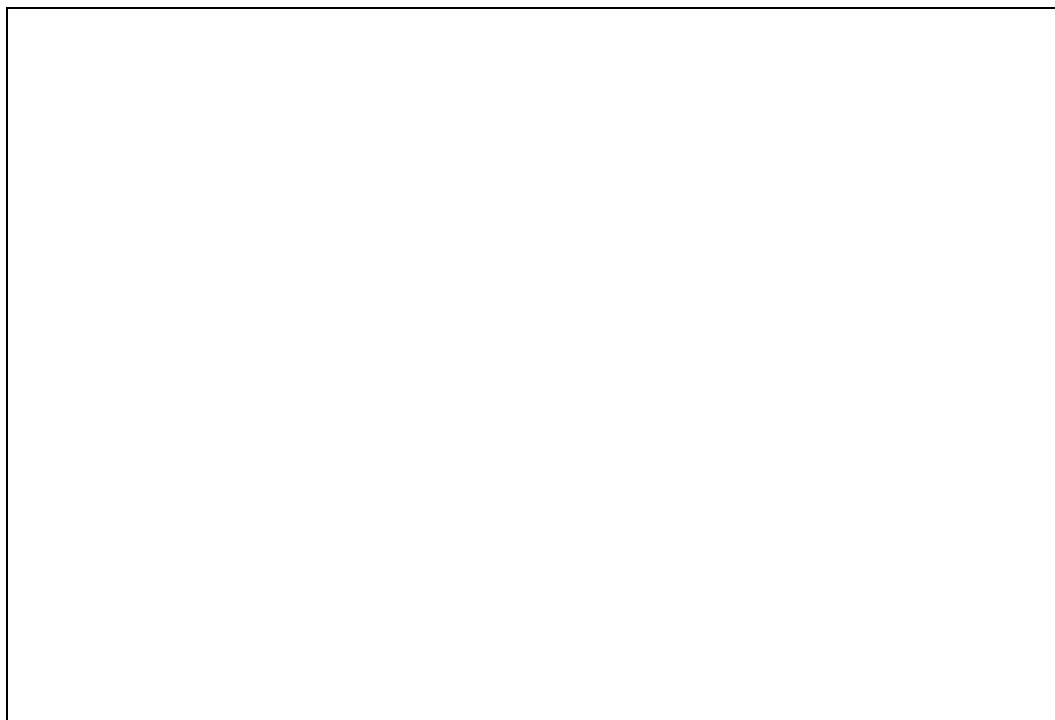


Рис.14. Зона обратных токов на выходе из вихревой горелки

Вихревые горелки обеспечивают устойчивое воспламенение угольной пыли (особенно при сжигании топлив с низким выходом летучих), при этом вторичный воздух закручивается с помощью аксиально или радиально расположенных направляющих лопаток или “улитки” (рис.27). В результате, истекающий в топочное пространство поток образует мощный турбулентный закрученный факел, на оси которого создаётся разрежение, что обеспечивает подсос большого количества раскалённых продуктов сгорания из ядра факела к устью горелки – так называемая **зона внутренней (приосевой) рециркуляции дымовых газов**. Это ускоряет прогрев смеси топлива с первичным воздухом и её воспламенение, т.е. **стабилизирует факел**. Размер

зоны внутренней рециркуляции (зоны обратных токов) и её удаление от среза горелки определяются геометрией горелки, степенью крутки и соотношением режимных параметров.

При факельном сжигании угольной пыли в топке в каждый момент времени находится ничтожный запас топлива – не более нескольких десятков килограммов. Это делает факельный процесс значительно более чувствительным к изменениям расходов топлива и воздуха (в сравнении со слоевым сжиганием) и позволяет в случае необходимости практически мгновенно изменять тепловую производительность топки (как при сжигании газа и мазута). Факельный способ сжигания предъявляет дополнительные требования к надёжности непрерывной подачи угольной пыли в топку, поскольку малейший (даже несколько секунд) перерыв может привести к погасанию факела, что связано с опасностью взрыва при возобновлении подачи топлива. Поэтому в пылеугольных котлах устанавливают несколько горелок.

Преимущества факельного способа сжигания по сравнению со слоевым:

- камерные топки пригодны для сжигания любого вида топлива, включая отходы углей, образующиеся при их обогащении;
- возможность создания топки практически на любую, сколь угодно большую мощность;
- надёжная эксплуатация при низких коэффициентах избытка воздуха (даже при сжигании угольной пыли $\alpha = 1,15 \div 1,2$);
- пониженный мехнедожог.

К **недостаткам** следует отнести следующее:

- ограничен нижний предел производительности (при сжигании угольной пыли тепловая мощность не ниже 20 МВт), т.е. невозможно сжигать угольную пыль в маленьких топках, особенно при переменных режимах работы;

- повышенные энергозатраты на собственные нужды в связи с необходимостью предварительной подготовки топлива (системы пылеприготовления – СПП);
- более высокие концентрации токсичных газов (оксидов азота и серы).

6.3. Сжигание в кипящем слое

Устойчивое горение пылеугольного факела возможно только при высокой температуре в ядре факела – не ниже 1300÷1500 °С. В этом диапазоне температур заметно возрастает скорость образования “термических воздушных” оксидов азота (подробнее об оксидах азота NO_x будет изложено в разделе 11) по реакции



В атмосфере оксид азота NO доокисляется до высокотоксичного диоксида NO₂, предельно допустимая (безопасная для людей) концентрация (ПДК) которого в приземном слое не должна превышать 0,085 мг/м³. Даже строительство высоких дымовых труб (для обеспечения рассеивания дымовых газов на как можно большую площадь) не всегда обеспечивает экологическую безопасность, особенно в районах сосредоточения большого количества топливоиспользующих установок.

При сжигании топлив, содержащих серу, образуется токсичный диоксид серы SO₂, вызывающий образование фотохимического смога и кислотных дождей, пагубно воздействующий не только на здоровье людей (вызывает раковые заболевания), но и на флору и фауну.

Одним из наиболее эффективных способов уменьшения вредных выбросов является **снижение температуры в зоне активного горения** до 850÷950 °С. При этих температурах скорость образования оксида азота по реакции (11) незначительна, а диоксид серы соединяется с оксидами кальция

и магния, входящими в минеральную часть топлива, по реакции (аналогичным образом реагирует и MgO):



Если содержание оксидов кальция и магния в золе недостаточно для связывания всего SO_2 (как правило, необходим двух- или трёхкратный его избыток по сравнению со стехиометрическим соотношением по реакции (12)), к топливу подмешивается известняк CaCO_3 . При температуре около 900°C известняк интенсивно разлагается на CaO и CO_2 , а гипс CaSO_4 не разлагается, т.е. реакция 12 необратима. Таким образом, токсичный SO_2 связывается до безвредного, практически не растворимого в воде гипса, который удаляется вместе с золой.

С другой стороны, в процессе жизнедеятельности человека образуется большое количество горючих органических отходов, которые не могут считаться топливом в общепринятом смысле: “хвосты” углеобогащения, отвалы при добыче угля, многочисленные отходы целлюлозно-бумажной и лесной промышленности и т.д. Например, огромные терриконы “пустой породы”, образующиеся вблизи угольных шахт, склонны к самовозгоранию, однако сжечь эту “породу” не удаётся ни в слоевых, ни в камерных топках из-за высокого содержания минеральных примесей. В слоевых топках зола, спекаясь при горении, препятствует проникновению кислорода к частицам горючего или забивает воздушные сопла, а в камерных — невозможно получить необходимую для устойчивого горения температуру.

Так возникшая перед человечеством проблема снижения вредных газообразных выбросов, а также необходимость разработки безотходных технологий поставили вопрос о создании топочных устройств для сжигания таких материалов. С этой целью разработан **способ сжигания в кипящем слое**.

Кипящим (псевдоожигенным) называется слой мелкодисперсного материала, продуваемый снизу вверх потоком какого-либо газа со скоростью, превышающей предел устойчивости плотного слоя, но недостаточной для

выноса частиц из слоя. Интенсивная хаотичная циркуляция частиц в ограниченном объёме создаёт впечатление бурно кипящей жидкости, сам слой приобретает некоторые её свойства, и его поведение подчиняется законам гидростатики, что и объясняет происхождение названия.

Если в камере сгорания (рис.15а) установить решётку, на которую поместить слой угля, и к решетке подать в небольшом количестве воздух, то после предварительного разогрева слоя начнётся горение топлива с поверхности с выделением газообразных продуктов сгорания. При восполнении сгорающего топлива, т.е. при непрерывной подаче топлива, на решётке будет поддерживаться фиксированный горящий слой (**слоевое сжигание топлива**).

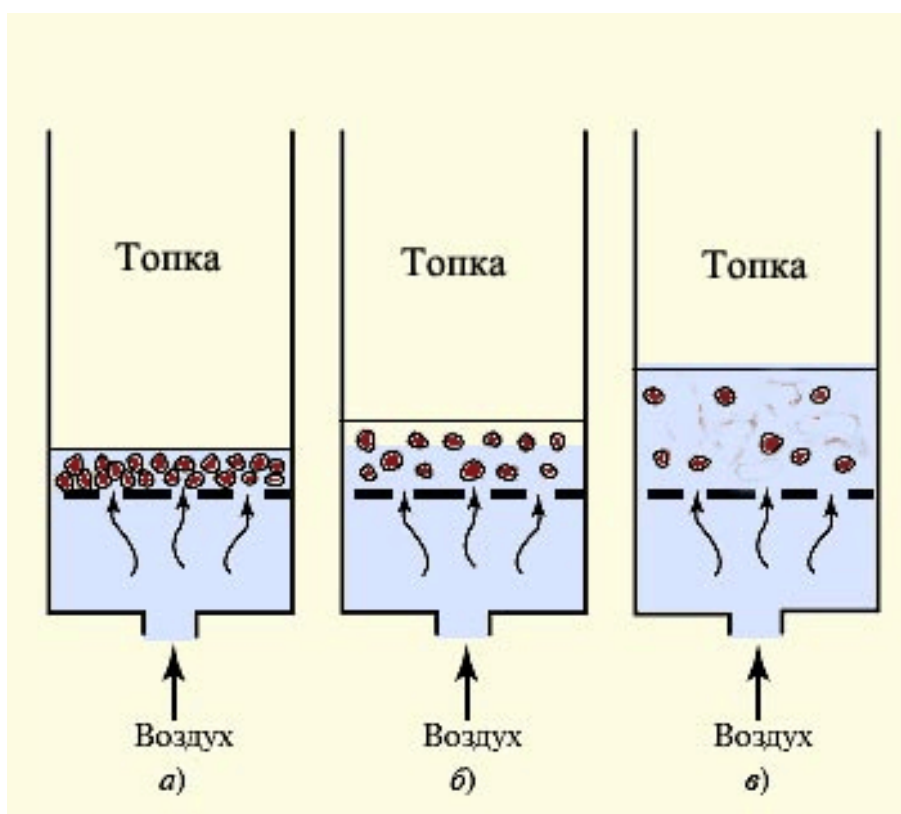


Рис.15. Изменение слоя топлива
при различных скоростях нижнего дутья

Если увеличивать подачу воздуха под решетку, то на частицы топлива, находящегося на решётке, будет действовать скоростной напор, который

будет противодействовать силе тяжести, действующей на каждую частицу топлива. При некоторой скорости воздуха частицы топлива окажутся во взвешенном состоянии в подъёмном потоке воздуха, а толщина горящего слоя возрастет (рис.15б). Переход неподвижного слоя в кипящий происходит при такой скорости оживающего агента, когда гидродинамическое давление потока P уравнивает силу тяжести G , действующую на частицы (рис.16). Минимальную скорость, при которой начинается псевдооживление, называют **первой критической скоростью** $W_{кр1}$.

При дальнейшем увеличении скорости толщина слоя ещё больше возрастает. Создаётся впечатление, что слой топлива “кипит”. Это так называемый **стационарный пузырьковый кипящий слой** (рис.15в, 16).

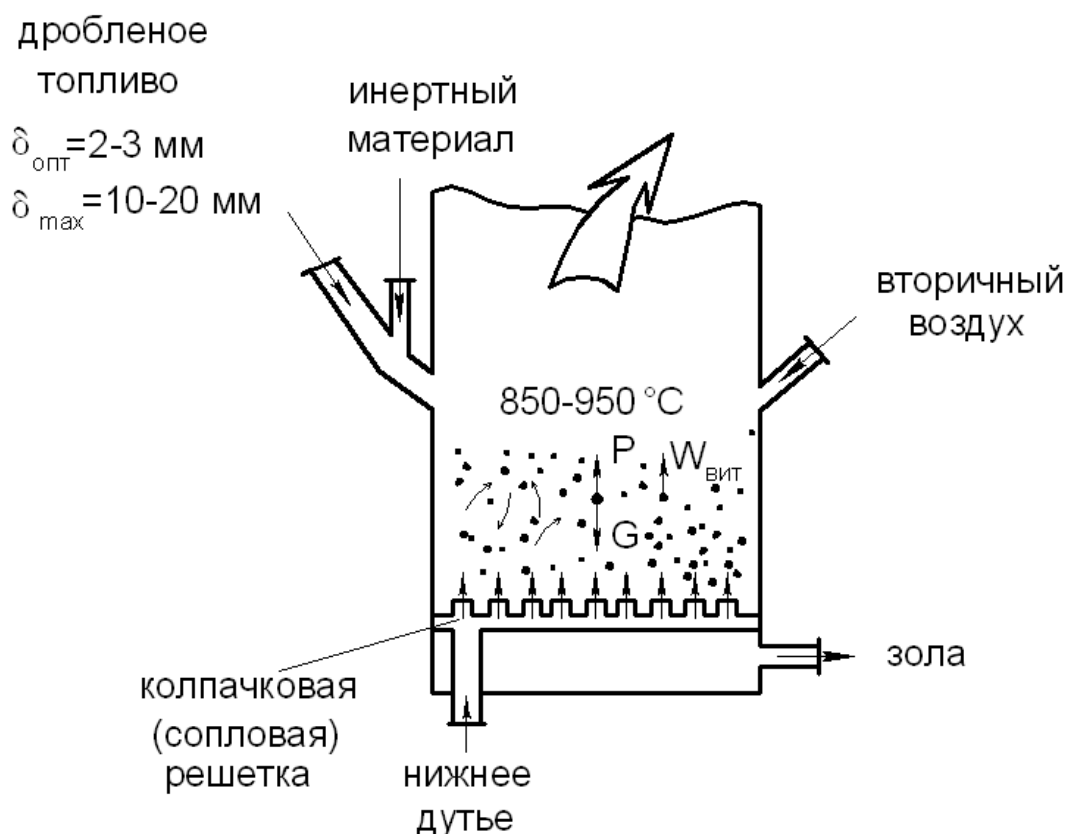


Рис.16. Стационарный кипящий слой (СКС)

При ещё большей скорости воздуха подъёмная сила, действующая на частицы топлива, возрастает настолько, что частицы не успевают сгорать, вырываются из кипящего слоя, видимый слой исчезает, и при достижении условия $P > G$ частицы топлива начинают выноситься из слоя.

Скорость, при которой аэродинамическая сила становится равной силе тяжести частиц топлива, называется **второй критической скоростью** $W_{кр2}$.

Реальные топочные устройства с кипящим слоем работают со скоростями от $W_{кр1}$ до $W_{кр2}$.

Различают топки с обычным, или **стационарным**, кипящим слоем (когда скорость в нем близка к $W_{кр1}$) и топки с **циркулирующим** кипящим слоем (когда скорость близка к $W_{кр2}$). При этом оба параметра (первая и вторая критические скорости) имеют строго определенные значения только для **монодисперсного материала с постоянной плотностью**, а слой состоит из **полифракционного** инертного материала и частиц топлива разной плотности.

В топках с кипящим слоем количество горючего материала составляет обычно небольшую долю от массы слоя, основу которого составляет какой-либо **инертный материал** или **зола топлива** (при сжигании высокосольных углей). Интенсивное перемешивание твердых частиц под воздействием ожижающего воздуха, проходящего через слой зернистого материала, обеспечивает повышенный тепло- и массообмен в слое. Погружение в кипящий слой поверхностей нагрева позволяет поддерживать температуру на таком уровне, при котором не происходит зашлаковки слоя.

В топку со **стационарным кипящим слоем** (см. рис.16) подаются известняк, песок, гранулированная зола или другой зернистый (инертный) материал, образующий с дробленым углем (размер частиц 1,5÷6 мм) суспензионный кипящий слой под действием восходящего потока воздуха, поступающего через сопла, расположенные в колпачковой решётке в нижней части топки.

Поддержание температуры кипящего слоя в необходимых пределах ($850\div 950\text{ }^{\circ}\text{C}$) и организация самого процесса “кипения” как раз и осуществляются за счёт того, что вместе с топливом подаётся какой-либо инертный мелкодисперсный материал (в соотношении примерно 1:1).

Простейшая топка с кипящим слоем имеет много общих конструктивных элементов со слоевой топкой. Принципиальное отличие заключается в интенсивном перемешивании частиц, что обеспечивает постоянство температуры по всему объёму (по высоте и сечению) кипящего слоя и, как следствие, высокие значения коэффициента теплоотдачи к поверхностям теплообмена.

Технология кипящего слоя позволяет сжигать дроблёное топливо с размером частиц до $10\div 20\text{ мм}$ (при сжигании древесных отходов – до 35 мм) при среднем оптимальном размере частиц $\delta_{\text{ср}}=2\div 3\text{ мм}$. Такому размеру частиц соответствует рабочая оптимальная скорость псевдоожижения (скорость витания частиц) от $1,5$ до 4 м/с , что в $2\div 3$ раза превышает скорость предела устойчивости плотного слоя, состоящего из частиц такого диаметра.

Вторым поколением развития технологии сжигания в кипящем слое является топка с **циркулирующим кипящим слоем** (рис.17).

Принципиальное отличие заключается в том, что за топкой устанавливается циклон, в котором все недогоревшие частицы улавливаются и возвращаются обратно в топку. Таким образом, частицы оказываются “запертыми” в замкнутой системе **топка-циклон-топка** до тех пор, пока не сгорят полностью. Такие реакторы по экономичности практически не уступают камерным топкам, при сохранении всех экологических преимуществ.

Топки с циркулирующим кипящим слоем отличаются более высокой степенью выгорания топлива (примерно $98\div 99\%$ против $90\div 95\%$ у котлов со стационарным кипящим слоем) и могут работать с меньшим коэффициентом избытка воздуха.



Рис.17. Циркулирующий кипящий слой (ЦКС)

Преимущества топок с кипящим слоем (по сравнению с пылеугольными котлами):

- более высокий коэффициент конвективного теплообмена;
- длительное пребывание частиц в слое позволяет сжигать дроблёное топливо, а также уголь с повышенной зольностью и отходы производства;
- возможность создать более компактное топочное устройство без системы пылеприготовления;
- добавка известняка в слой связывает серу топлива с зольным остатком, что уменьшает выбросы сернистого ангидрида с дымовыми газами в атмосферу;
- низкие температуры в слое ($800 \div 950$ °С) обеспечивают отсутствие термических оксидов азота, что приводит к сокращению выбросов оксидов азота в атмосферу.

Наряду с преимуществами использования котлов с топками низкотемпературного кипящего слоя, многолетний опыт их эксплуатации показал и их явные **недостатки**:

- сложность регулирования производительности котла, что обусловлено узким диапазоном рабочих температур реактора кипящего слоя, так как при увеличении температуры кипящего слоя выше 900÷950 °С происходит шлакование слоя, что является аварийной ситуацией и вызывает необходимость остановки котла;
- при понижении температуры слоя до 750 °С горение становится неустойчивым и возможно его прекращение, вызывающее необходимость повторного запуска котла, что сопряжено с временными и трудовыми затратами;
- истирание частиц твёрдого инертного материала и унос их потоком ожижающего агента;
- эрозия поверхностей нагрева;
- ограниченный диапазон скоростей ожижающего агента;
- повышенный расход электроэнергии на привод высоконапорных вентиляторов для подачи воздуха в зону горения и создания кипящего слоя.

Область применения котлов с кипящим слоем – сжигание низкосортных твердых топлив при паропроизводительности до 250 т/ч как для новых ТЭС, так и проходящих модернизацию. В мире в настоящее время эксплуатируется более 200 энергетических котлов с ЦКС, в том числе освоено энергоблок мощностью 250 МВт. В России разрабатываются котлы с ЦКС паропроизводительностью 160, 500 и 1000 т/ч для сжигания каменных и бурых углей различных месторождений.

Топки с кипящим слоем широко используются не только (и даже не столько) в энергетике, но и в других отраслях промышленности для:

- сжигания колчеданов с целью получения SO₂;

- обжига различных руд и их концентратов (цинковых, медных, никелевых, золотосодержащих);
- термического обезвреживания различных вредных веществ (твёрдых, жидких и газообразных), например, шламов осветления сточных вод, городского мусора, бытовых отходов и т.д.

6.4. Вихревые топki

6.4.1. Высокотемпературное вихревое сжигание

Высокотемпературное вихревое сжигание (ВТВ) осуществляется в **циклонно-вихревых топках** (рис.18). Этот способ также позволяет сжигать газообразное, жидкое и дроблёное твёрдое топливо (с размером частиц, как правило, до 5 мм).

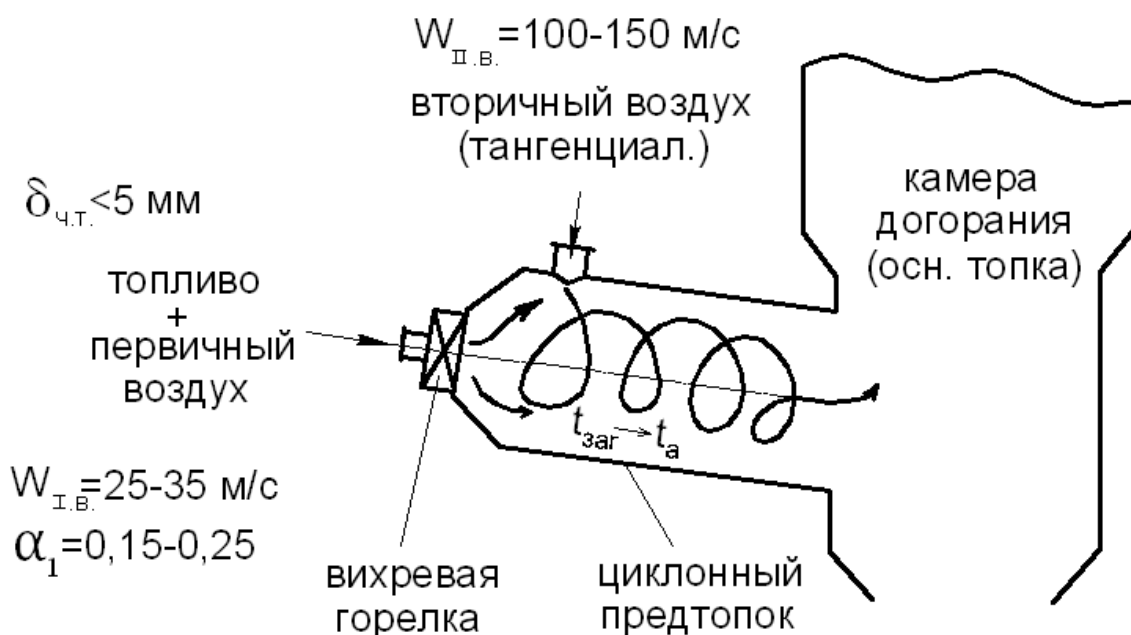


Рис.18. Высокотемпературное вихревое сжигание

Перед основной топкой (камерой догорания) монтируется циклонный предтопок (обычно, неэкранируемый). Смесь топлива с первичным воздухом

подаётся по оси предтопка, а вторичный воздух – по касательной к образующей циклона со скоростью около 100 м/с. Таким образом создаётся мощный вихрь, обеспечивающий условия для многократной циркуляции частиц топлива в вихревом потоке, что увеличивает время их пребывания в зоне активного горения при температурах, близких к адиабатным (до 2000 °С), что и позволяет сжигать более крупные частицы, чем при факельном способе сжигания.

Циклонно-вихревые камеры предвключаются к основному топочному объёму, что предусматривает ступенчатое сжигание со всеми его достоинствами. При этом в циклонном предтопке, во всем диапазоне нагрузок котла, имеет место активное циклонно-вихревое движение среды с интенсивным центробежным полем и высокой турбулентностью.

По ряду причин в энергетике этот способ сжигания используется очень редко. Как правило, сфера применения схожа с реакторами с кипящим слоем: технологические процессы, термическое обезвреживание и т.д.

6.4.2. Низкотемпературное вихревое сжигание

Другой разновидностью вихревого сжигания является **низкотемпературный вихревой (НТВ) способ сжигания**, разработанный профессором В.В.Померанцевым (рис.19).

В основу НТВ-технологии заложен принцип организации низкотемпературного сжигания грубодисперсного твердого топлива в условиях многократной циркуляции частиц в камерной топке.

В НТВ-топке организованы две зоны горения, которые условно разнесены по ее высоте: **вихревая** и **прямоточная**. Вихревая зона занимает объём нижней части топки от устья топочной воронки до горелок. Прямоточная зона горения располагается над вихревой зоной в верхней части топки.

Аэродинамика вихревой зоны создается за счет взаимодействия двух организованных потоков: первый поток сформирован из топливно-воздушной смеси, поступающей в топку через горелки; второй поток состоит из горячего воздуха, подаваемого в топку через систему нижнего дутья (скорость около 100 м/с). Потоки направлены навстречу друг другу по касательной и образуют пару сил, создающую вихревое движение в нижней части топки.

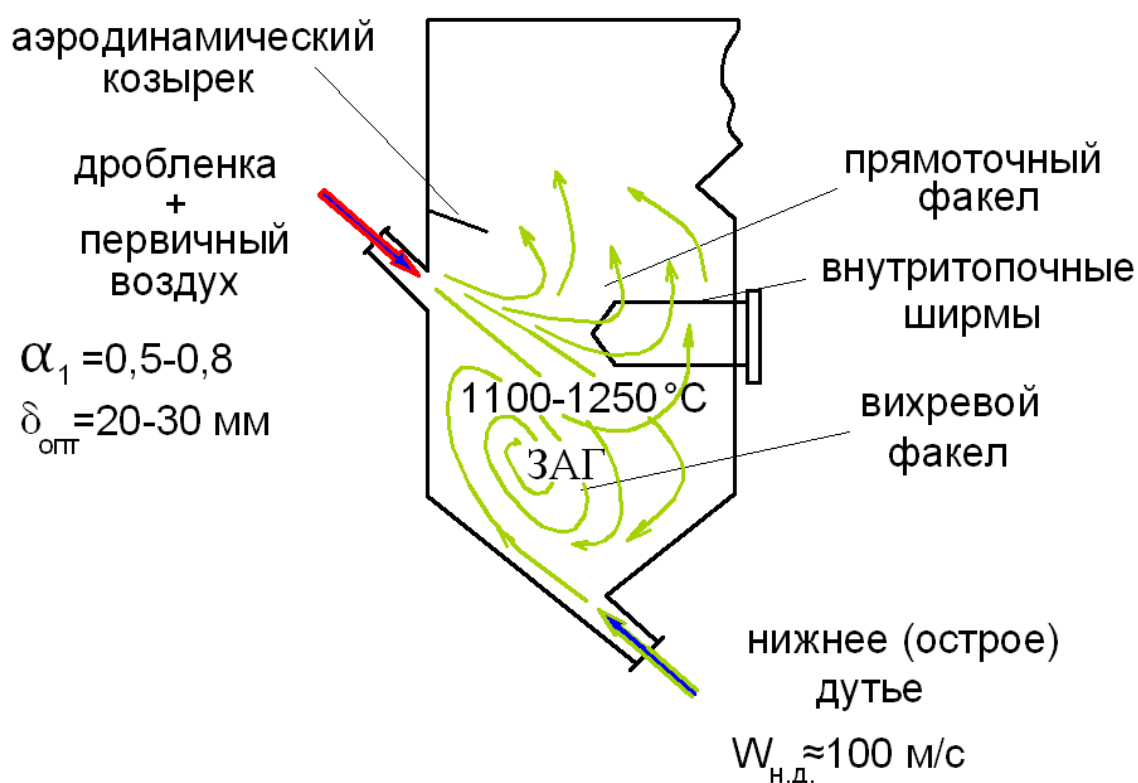


Рис.19. Низкотемпературная вихревая топка Померанцева

В отличие от традиционной технологии пылеугольного сжигания, где основная часть топлива (до 95 %) сгорает в так называемой "зоне активного горения", расположенной в районе горелок и занимающей относительно небольшой объем топочной камеры, в вихревой топке с НТВ-технологией сжигания в "зону активного горения" вовлечен значительно больший объем топочного пространства. В результате снижается максимальная температура

в вихревой топке (примерно на $100\div 300\text{ }^{\circ}\text{C}$), и за счет активной аэродинамики выравнивается уровень температуры в объеме вихревой зоны. Отсюда и название – **низкотемпературный вихрь**.

Пониженный температурный уровень и повышенная конвективная составляющая коэффициента теплоотдачи позволяют устанавливать **внутритопочные ширмовые поверхности нагрева**, что обеспечивает дополнительный теплосъем и позволяет **уменьшить габариты (высоту) топочной камеры**.

Снижение выбросов оксидов азота в НТВ-топке обусловлено условиями топочного процесса: низким уровнем температуры в зоне активного горения и ступенчатым подводом окислителя к топливу. Максимальная температура продуктов сгорания в классической НТВ-топке не превышает $1100\div 1250\text{ }^{\circ}\text{C}$. Вихревая зона топки является практически **изотермичной**. При таком температурном уровне образуются, в основном, топливные оксиды азота, количество воздушных оксидов азота ничтожно мало (см. раздел 11). Коэффициент избытка воздуха в горелках (доля первичного воздуха) зависит от марки топлива и лежит в диапазоне $\alpha_1 = 0,5\div 0,8$. В результате применения НТВ-сжигания удастся снизить концентрацию оксидов азота на $20\div 50\%$ в сравнении с традиционной технологией сжигания в прямоточном факеле.

В НТВ-топке созданы также благоприятные условия для связывания **оксидов серы**. Низкий уровень температуры определяет активное связывание оксидов серы основными оксидами (CaO , MgO) минеральной части топлива. Этому процессу способствует увеличение времени пребывания связывающих компонентов в вихревой зоне, а также меньшая оплавленность (т.е. большая поверхность реагирования) частиц золы. Применение НТВ-технологии сжигания позволяет повысить степень связывания оксидов серы в пределах газового тракта котла на $20\div 50\%$ (в зависимости от марки топлива) в сравнении с технологией прямоточного

факела. Кроме того, как показывает опыт, условия вихревой топки позволяют эффективно использовать различные сорбенты на основе СаО для повышения степени связывания оксидов серы.

Укрупнение помола топлива при НТВ-сжигании приводит к **укрупнению летучей золы уноса**. Испытания золоулавливающего оборудования котлов, переведённых на НТВ-сжигание, показали повышение эффективности работы золоуловителей циклонного типа и электрофильтров.

Таким образом, пониженный уровень температуры, ступенчатый ввод окислителя, многократная циркуляция горящих топливных частиц и углубление гранулометрического состава золы в совокупности обеспечивают улучшенные показатели вихревых топок по вредным выбросам (оксидам азота и серы), а также повышают эффективность работы золоулавливающего оборудования котельной установки.

НТВ-топка отличается **высокой устойчивостью воспламенения** топлива, что особенно актуально при сжигании низкосортных топлив. Несмотря на пониженный уровень температуры, благодаря организованной многократной циркуляции горящих коксовых частиц топлива и ступенчатому подводу воздуха в вихревой зоне топки создан устойчивый и надежный механизм, стабилизирующий воспламенение и обеспечивающий выгорание топлива. Важную роль при этом имеет конструктивное исполнение горелочно-сопловых устройств и аэродинамические приемы, обеспечивающие взаимодействие горелочных и сопловых потоков между собой. НТВ-топка позволяет обеспечить эффективное сжигание низкосортных топлив без использования "подсветки" пылеугольного факела газом и мазутом.

Применение НТВ-сжигания позволяет практически полностью исключить **шлакование поверхностей нагрева** котла и повысить надежность его работы. Пониженный уровень температуры в зоне активного горения снижает количество расплавленных частиц золы, что в сочетании с

активной аэродинамикой снижает вероятность возникновения отложений на поверхностях нагрева котла.

НТВ-технология сжигания получила апробацию на широкой гамме твердых топлив, таких как торф, бурые и каменные угли, горючие сланцы, отходы деревообработки и микробиологического производства.

Характеристики опробованных при НТВ-сжигании твердых органических топлив находятся в следующих диапазонах:

- | | |
|---|----------|
| • влажность на рабочую массу, W_t^r , % | 14÷75; |
| • зольность на рабочую массу, A^r , % | 5÷50; |
| • выход летучих на горючую массу, V^{daf} , % | 23÷90; |
| • теплота сгорания, Q_i^r , МДж/кг | 4,2÷26; |
| • содержание серы на рабочую массу, S^r , % | 0,2÷3,0; |
| • содержание азота на рабочую массу, N^r , % | 0,4÷2,0. |

Достоинства НТВ-сжигания

Применение НТВ-технологии позволяет:

- упростить систему подготовки топлива (возможность сжигать дроблёный уголь с размером частиц до 20÷30 мм), увеличить её производительность, обеспечить взрывобезопасность, снизить затраты на подготовку топлива к сжиганию, увеличить срок службы размольного оборудования;
- стабилизировать воспламенение и горение и отказаться от "подсветки" факела газом или мазутом, даже при сжигании низкосортных топлив;
- обеспечить устойчивый процесс горения вне зависимости от колебаний нагрузки котла и технических характеристик топлива, что унифицирует топку по топливу;

- повысить коэффициент тепловой эффективности топки, что дает возможность увеличить паропроизводительность котла на 15÷20 %;
- создавать малогабаритные котлы большой мощности;
- исключить шлакование и загрязнение топочных и конвективных поверхностей нагрева;
- обеспечить снижение выбросов оксидов азота NO_x на 20÷50 %;
- обеспечить снижение выбросов оксидов серы SO_x на 20÷40 % за счет их связывания с основными оксидами золы (CaO и MgO) при благоприятных внутритопочных условиях;
- обеспечить более глубокое связывание оксидов серы за счет ввода в вихревую топку CaO -содержащих добавок.

Недостатки:

- повышенный мехнедожог (из-за уноса крупных недогоревших частиц);
- эрозия внутритопочных поверхностей нагрева.

В промышленной теплоэнергетике основным является **факельное сжигание**, когда в топочную камеру через прямоточные или вихревые горелки подаются потоки топлива и воздуха или топливовоздушной смеси (а иногда – ещё и газы рециркуляции). Реже применяются циклонно-вихревой способ, низкотемпературный вихрь и кипящий слой.

7. Основы кинетики процесса горения

Основу процесса горения составляет химическое взаимодействие между горючими веществами и окислителем. Поэтому особое внимание следует уделить изучению химического фактора при горении топлива.

Учение о механизме и общих закономерностях протекания химического процесса во времени называется **химической кинетикой**.

7.1. Скорость реакции горения и её зависимость от концентрации реагирующих веществ

В химической кинетике скорость гомогенной реакции определяется количеством вещества, прореагировавшего в единице объёма за единицу времени:

$$W_i = -\frac{1}{V} \cdot \frac{dn_i}{d\tau}, \text{ кмоль}/(\text{м}^3 \cdot \text{с}).$$

В закрытой системе при $V = \text{const}$

$$W_i = -\frac{d}{d\tau} \left(\frac{n_i}{V} \right) = -\frac{dC_i}{d\tau}.$$

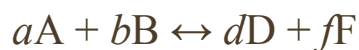
Здесь знак “минус” указывает на уменьшение концентрации вещества в процессе реакции.

Для совершения реакции, прежде всего, необходимо столкновение молекул. Количество таких столкновений тем больше, чем больше количество молекул в единице объёма, т.е. чем больше концентрация реагирующих веществ.

Скорость реакции горения можно характеризовать скоростью расхода исходных веществ или скоростью образования конечных продуктов сгорания.

На примере реакции горения водорода $2\text{H}_2 + \text{O}_2 = 2\text{H}_2\text{O}$ видно, что расход водорода в единицу времени в 2 раза превышает расход кислорода. Следовательно, скорость реакции, измеренная по расходу водорода, не равна скорости реакции, измеренной по расходу кислорода. Чтобы избежать такой неоднозначности, необходимо указывать, по какому компоненту (исходному или конечному) определяется скорость реакции.

В общем случае для обратимой реакции



в состоянии равновесия при постоянной температуре соблюдается соотношение:

$$\frac{[D]^d [F]^f}{[A]^a [B]^b} = K_c.$$

Это соотношение носит название **закон действующих масс**, который формулируется следующим образом:

при постоянной температуре отношение произведения равновесных концентраций продуктов реакции, взятых в степенях, равных их коэффициентам, к произведению равновесных концентраций исходных веществ, взятых в степенях, равных их коэффициентам, есть величина постоянная.

Постоянная величина **K_c** называется **константой равновесия** данной реакции. Индекс "с" в обозначении этой величины показывает, что для расчета константы использовались концентрации.

Если константа равновесия велика, то равновесие смещено в сторону продуктов прямой реакции, если мала, то – в сторону исходных веществ. Если константа равновесия очень велика, то говорят, что реакция **"практически необратима"**, если константа равновесия очень мала, то реакция **"практически не идёт"**. Константа равновесия для каждой обратимой реакции – величина постоянная только при постоянной температуре. Для одной и той же реакции при разных температурах константа равновесия принимает разные значения.

Согласно **закону действующих масс**, в закрытой гомогенной системе при постоянной температуре скорость химической реакции

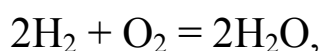


в каждый момент времени пропорциональна произведению концентраций реагирующих веществ:

$$W = kC_A^a C_B^b .$$

Наравне с прямой реакцией возможно протекание и обратной, скорость которой увеличивается по мере накопления продуктов реакции.

Так, для реакции горения водорода



согласно закону действующих масс, скорости прямой и обратной реакций:

$$W_1 = k_1 C_{\text{H}_2}^2 C_{\text{O}_2} ;$$

$$W_2 = k_2 C_{\text{H}_2\text{O}}^2 ,$$

где k_1, k_2 – коэффициенты пропорциональности, называемые **константами скорости реакции**.

Константа скорости реакции характеризует **количество эффективных столкновений молекул**, приводящих к реакции.

Результирующая скорость реакции $W_{\text{рез}} = W_1 - W_2$. В случае, когда $W_1 \gg W_2$, можно пренебречь скоростью обратной реакции и принять $W_{\text{рез}} = W_1$. Такая реакция называется **необратимой**.

При анализе топочных процессов **реакции горения** считаются **необратимыми**, если они протекают в области температур **ниже 1800–2000 °С**, поскольку диссоциация продуктов сгорания $\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}, \text{SO}_2$ в этих условиях ничтожна.

Показатели степени (**a** и **b**) при концентрациях реагирующих веществ в кинетическом уравнении называются **порядком реакции** по данному веществу.

Сумма порядков реакции по отдельным компонентам называется общим, или полным, кинетическим порядком реакции: **$n = a + b$** .

Для элементарных химических реакций порядок реакции равен молекулярности. Моно-, би- и тримолекулярные реакции являются, соответственно, реакциями первого, второго и третьего порядков.

Так как итоговое стехиометрическое уравнение сложной реакции не отражает механизм её протекания, то и стехиометрические коэффициенты **a** и **b** не выражают порядок реакции по отдельным компонентам, а их сумма не равна порядку реакции в целом.

Экспериментальным путём устанавливаются опытные коэффициенты **α** и **β**, отражающие суммарный механизм протекания сложной многостадийной реакции:

$$W = kC_A^\alpha C_B^\beta.$$

Коэффициенты **α** и **β** называются порядками сложной реакции по отдельным компонентам. Поскольку в сложной реакции порядок по отдельным компонентам не равен соответствующим стехиометрическим коэффициентам, то и суммарный порядок сложной реакции не равен сумме стехиометрических коэффициентов:

$$n = \alpha + \beta.$$

Факторы, влияющие на скорость реакции (концентрация реагирующих веществ, температура, давление, наличие катализаторов), оказывают влияние на величину порядка реакции. В зависимости от механизма реакции и условий её протекания, значение порядка реакции может быть целым или дробным, положительным или отрицательным, а также нулевым.

Дробный и отрицательный порядок имеют сложные реакции, протекающие через ряд последовательных и параллельных стадий с образованием не только конечных, но и промежуточных продуктов.

Нулевой порядок по данному компоненту показывает, что в ходе реакции её скорость **не зависит** от концентрации данного вещества. Примером реакции нулевого порядка по данному компоненту является реакция, когда одно из реагирующих веществ поддерживается в большом избытке, и во время реакции его концентрация практически не изменяется

(например, горение топлива в калориметрической бомбе, заполненной кислородом под большим давлением).

Гетерогенное горение жидкого и твёрдого топлива имеет некоторые особенности, оказывающие влияние на характер зависимости скорости от концентрации реагирующих веществ.

При горении **жидкого топлива** расход паров горючего будет непрерывно пополняться испарением с поверхности жидкой частицы. Поэтому концентрация паров горючего у поверхности частицы остаётся постоянной и не будет влиять на скорость горения жидкого топлива. Изменение скорости горения происходит только в результате **изменения концентрации окислителя** в зоне протекания реакции.

При горении **твёрдого топлива** химические реакции происходят на поверхности топлива в результате столкновений частиц газообразного окислителя (атомов, молекул, радикалов) с молекулами горючего. Количество этих столкновений, отнесённое к единице поверхности, зависит только от концентрации окислителя. Следовательно, изменение скорости реакции горения будет определяться только **изменением концентрации окислителя** у поверхности частицы.

Таким образом, при гетерогенном горении концентрация горючего на поверхности частицы жидкого и твёрдого топлива остаётся постоянной. Тогда кинетическое уравнение преобразуется к виду:

$$W = kC_{гор}^{\alpha}C_{ок}^{\beta} = k^{*}C_{ок}^{\beta},$$

где $k^{*} = kC_{гор}^{\alpha}$ – константа скорости реакции гетерогенного горения.

Для **натурального твёрдого топлива**, в состав которого, кроме активных горючих элементов, входят минеральные примеси, не участвующие в окислительном процессе, скорость реакции уменьшается вследствие **“холостых” столкновений** молекул окислителя с частицами минеральных примесей.

7.2. Энергия активации. Тепловой эффект реакции

Согласно молекулярно-кинетической теории, химическая реакция представляет собой процесс разрушения старых молекулярных связей вещества и создания новых.

В любом выделенном объёме, имеющем постоянную температуру, отдельные молекулы вещества двигаются с различными скоростями, т.е. имеют разные кинетические энергии. Химическая реакция может протекать только в том случае, если соударение молекул произойдёт с энергией, достаточной для разрушения старых внутримолекулярных связей.

Многие, даже очень быстрые, реакции при простом соприкосновении реагентов не идут. Например, смесь водорода с кислородом может очень долго находиться при комнатной температуре, не вступая в реакцию друг с другом. Но стоит только поднести к ней горящую спичку, как реакция начинает протекать очень быстро, часто со взрывом (поэтому смесь водорода с кислородом в объемном отношении 2:1 даже называют "гремучим газом").

В чем же причина? Как уже отмечалось, **не любые соударения** молекул или других химических частиц приводят к их взаимодействию, а **только эффективные**, т.е. те соударения частиц, суммарная энергия которых больше какого-то определенного значения. Эта "пороговая" энергия, или минимальная энергия, которую нужно сообщить молекуле, чтобы преодолеть внутримолекулярные силы сцепления, называется **энергией активации E_A** данной реакции. После получения такой энергии внутренние связи в молекуле разрушаются, и она (молекула) становится готовой к образованию нового вещества.

Таким образом, энергию активации можно рассматривать как своего рода **энергетический барьер**, который необходимо преодолеть, прежде чем произойдёт реакция.

На рис.20 условно показаны процесс протекания реакции и энергия активации.

В состоянии (1) молекулы исходных веществ имеют запас внутренней энергии E_1 , не достаточный для разрушения молекул при их столкновении.

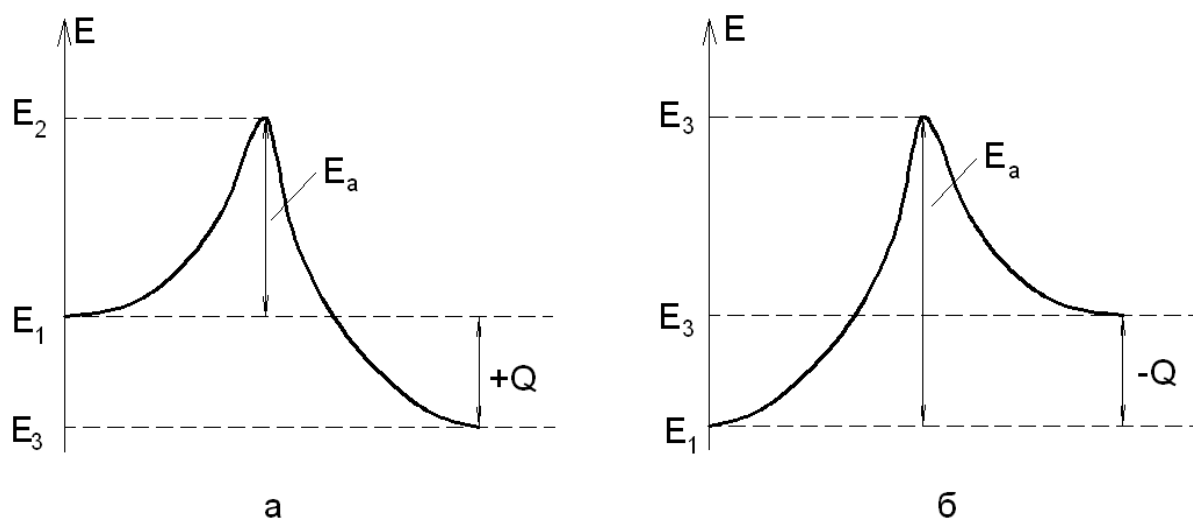


Рис. 20. Энергия активации и тепловой эффект реакции:

а – экзотермическая реакция; б – эндотермическая реакция

Для осуществления прямой реакции к системе необходимо подвести некоторое количество энергии E_A . Она и является энергией активации прямой реакции. При этом молекулы переходят в состояние (2) с внутренней энергией

$$E_2 = E_1 + E_A.$$

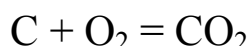
В состоянии (2) молекулы при столкновении вступают в химическую реакцию с образованием продуктов реакции и выделением теплоты. После охлаждения продуктов реакции до начальной температуры (состояние 3) внутренняя энергия продуктов сгорания (если речь идёт о реакции горения) будет равна E_3 , а количество выделяемой энергии $E_2 - E_3$.

Разность между выделившейся энергией и энергией активации E_A , поглощаемой в процессе активации молекул, представляет собой **тепловой эффект реакции** $Q = E_1 - E_3$.

Если эта разность положительна (рис.20а), т.е. $Q > 0$, то реакция **экзотермическая**, если – отрицательная (рис.20б), т.е. $Q < 0$, то реакция **эндотермическая**.

Очевидно, что если прямая реакция является экзотермической, то обратная будет эндотермической.

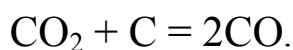
Чем выше энергия активации, тем труднее осуществить реакцию. Например, для реакции окисления углерода кислородом воздуха



энергия активации, по данным различных исследователей, составляет

$$E_A = (25,6 \div 40) \text{ ккал/г-моль} = (107000 \div 167000) \text{ кДж/кмоль}.$$

При высоких температурах возможна реакция восстановления двуокиси углерода у раскалённой поверхности углерода



Энергия активации для этой реакции

$$E_A = (32 \div 51,4) \text{ ккал/г-моль} = (134000 \div 215000) \text{ кДж/кмоль}.$$

На величину энергии активации сильное влияние оказывает температура. При повышении температуры увеличивается кинетическая энергия молекул исходных веществ, соответственно уменьшается количество энергии, необходимой для доведения молекул до активного состояния.

Если энергия активации невелика, то в исходных веществах всегда найдутся молекулы, которые смогут преодолеть "энергетический барьер" и превратиться в молекулы продуктов реакции. Если же энергия активации велика, то таких молекул в реакторе может и не оказаться. Таким образом, скорость реакции при прочих равных условиях тем больше, чем меньше ее энергия активации.

На практике часто встречаются случаи, когда необходимо осуществить реакцию, энергия активации которой очень велика. Скорость такой реакции, естественно, очень мала или практически равна нулю. Если при этом сильно нагреть реакционную смесь нельзя (например, исходное вещество при таком нагревании разлагается, или равновесие смещается в сторону исходного

вещества), то для получения нужного вещества приходится идти "обходным путем", применяя **катализаторы**.

7.3. Зависимость скорости реакции от температуры.

Закон Максвелла - Больцмана. Закон Аррениуса

Скорость химической реакции в значительной степени зависит от температуры. Чаще всего, для начала активной реакции систему реагирующих веществ необходимо подогреть. При этом увеличивается количество так называемых **“активных” молекул**, имеющих энергию выше энергии активации.

Количество молекул, обладающих тем или иным уровнем энергии E , определяется статистическим законом **Максвелла – Больцмана** (рис.21):

$$N_E = N_0 \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT}\right),$$

где N_0 – полное количество молекул в единице объёма;

R – универсальная газовая постоянная, $R = 8,314$ кДж/(кмоль·К).

При низкой температуре T_1 лишь малая доля молекул (заштрихованная площадь под кривой T_1) имеет энергию выше энергии активации E_A . Их так мало, что тепла, выделяющегося в результате отдельных актов реакции, недостаточно, чтобы заметно повысить температуру смеси.

С повышением температуры до T_2 происходит перераспределение энергий молекул (заштрихованная площадь под кривой T_2), в результате чего становится возможной активная реакция, сопровождающаяся ростом температуры.

Естественно, что при более низком уровне энергии активации химическая реакция может протекать при более низкой температуре.

Одновременно с увеличением количества “активных” молекул растёт и скорость химической реакции.

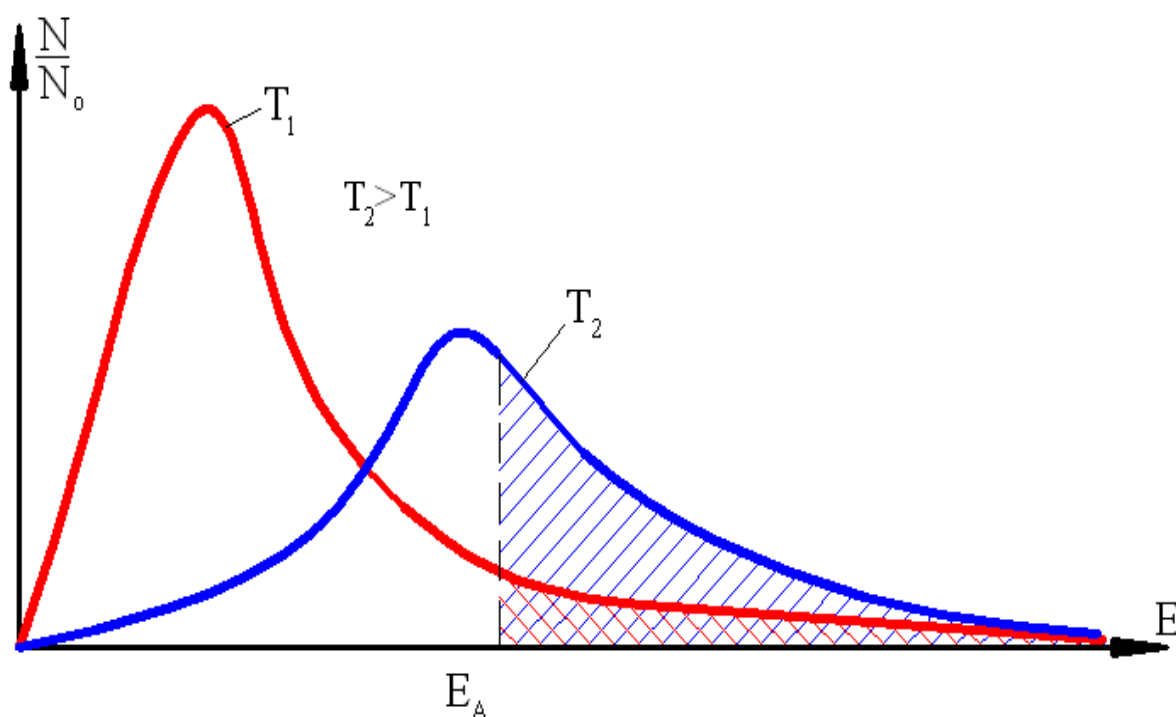


Рис. 21. Статистический закон Максвелла - Больцмана

Из закона Максвелла-Больцмана, описывающего распределение молекул в соответствии с их кинетической энергией, следует, что количество молекул, обладающих энергией $E > E_A$, пропорционально $\exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$.

Зависимость скорости реакции от температуры была установлена в 1889 г. шведским учёным **Сванте Аррениусом** и представляет собой частный случай общего закона Максвелла - Больцмана применительно к химическим реакциям (рис.22).

Закон Аррениуса, полученный эмпирическим путём, устанавливает зависимость константы скорости химической реакции **k** от температуры **T**:

$$k = k_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_A}{RT}\right),$$

где k_0 – коэффициент пропорциональности, характеризующий частоту столкновений всех реагирующих молекул (активных и неактивных) в единице объёма реагирующей смеси.

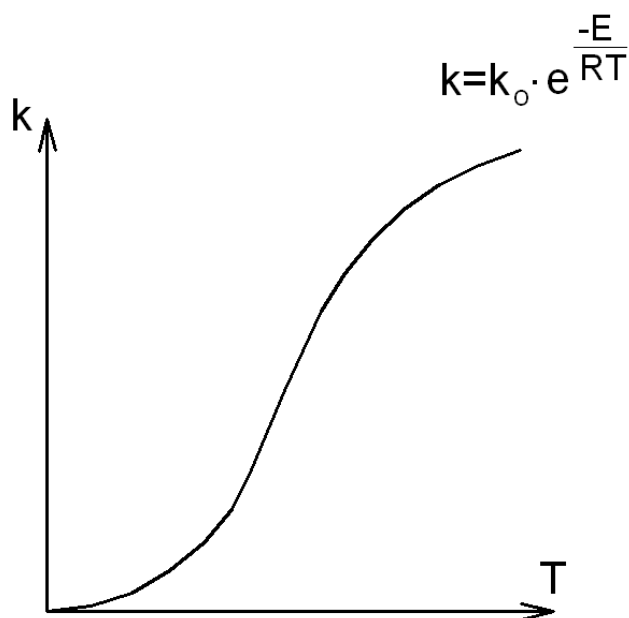


Рис. 22. Закон Аррениуса

Количество столкновений зависит от скорости свободного пробега молекул, которая, в свою очередь, согласно кинетической теории, пропорциональна корню квадратному из значения температуры, т.е. $k_0 = A \cdot \sqrt{T}$. Оценки этого параметра показывают, что изменение температуры в диапазоне от 200 °С до 300 °С приводит к изменению частоты столкновений на 10 %.

Множитель $\exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$ отражает долю общего количества столкновений, которые возникают между “активными” молекулами и приводят к реакции.

Таким образом, с увеличением температуры константа скорости реакции увеличивается, что при сохранении концентрации исходных веществ приводит к росту скорости реакции.

Закон Аррениуса стал одним из основных уравнений химической кинетики, а энергия активации – важной количественной характеристикой реакционной способности веществ.

В качестве примера рассмотрим горение углерода с образованием двуокиси углерода при энергии активации $E=125000$ кДж/кмоль и температурах 1000 К и 1500 К. При этом концентрации кислорода у поверхности горения и в объёме будем считать одинаковыми.

Если принять вначале $k_0=\text{const}$ при обеих температурах, то соотношение скоростей реакции составит:

$$W_{p1500} / W_{p1000} = \exp(-125000/(8,314 \cdot 1500)) / \exp(-125000/(8,314 \cdot 1000)) = \\ = \exp(-10) / \exp(-15) = \exp(5) = 145.$$

При дальнейшем повышении температуры реакции возрастание скорости ослабевает. Так, при увеличении температуры ещё на 500 °С соотношение скоростей составит:

$$W_{p2000} / W_{p1500} = \exp(-7,5) / \exp(-10) = \exp(2,5) = 12,2.$$

В то же время, за счёт роста температуры увеличиваются и скорости движения молекул, а, следовательно, и значение предэкспоненциального множителя k_0 , но незначительно:

$$k_{01500} / k_{01000} = (1500 / 1000)^{0,5} = 1,22.$$

Очевидно, что изменение k_0 несоизмеримо с влиянием температуры на рост количества реакционно-способных молекул и их соударений.

С учётом изменения k_0 в реакции, суммарное увеличение скорости реакции в первом случае составит:

$$W_{p1500} / W_{p1000} = 145 \cdot 1,22 = 177.$$

Как видно из примера, воздействие роста температуры на скорость химической реакции постепенно ослабевает, а скорость реакции стремится к какому-то ограниченному максимуму.

Это следует хотя бы из анализа зависимости $\exp(-E/(RT))$:
если $T \rightarrow \infty$, то величина $\exp(-E/(RT)) \rightarrow 1$, а $k \rightarrow k_0$.

Следовательно, на кривой $\exp(-E/(RT))=f(T)$ должен быть перегиб.

До перегиба происходит интенсивное нарастание значения функции (а, следовательно, и скорости химической реакции); после перегиба её рост ослабевает, она асимптотически приближается к постоянной величине.

Точку перегиба можно определить, приравняв вторую производную нулю. Обозначим $RT/E = x$, тогда функция $y = \exp(-1/x)$;

$$y'' = d^2y / dx^2 = ((1-2x)/x^4) \exp(-1/x) = 0.$$

Отсюда следует, что перегиб имеет место при $x = 1/2$, а $T_{\text{пер}} = E/(2R)$.

Например, для реакции горения углерода при $E=125000$ кДж/кмоль

$$T_{\text{пер}} = 125000/(2 \cdot 8,314) = 7517 \text{ K}.$$

Для всех интересующих нас реакций горения точка перегиба оказывается значительно выше реально достижимых температур.

Таким образом, мы имеем дело с той частью кривой, где с нарастанием температуры интенсивно увеличивается скорость реакции.

7.4. Зависимость скорости горения от физических и химических факторов. Кинетическое и диффузионное горение

Горение - это сложный физико-химический процесс, в основе которого лежит химическое взаимодействие между горючими веществами и окислителем.

В реальных условиях **интенсивность горения** определяется скоростью расхода горючих веществ и зависит не только от **скорости протекания химической реакции**, но и от **скорости процесса образования горючей смеси** (скорости смесеобразования).

Скорость химической реакции определяется законами химической **кинетики** – учения о механизмах протекания химического процесса во времени. Скорость процесса смесеобразования определяется, в свою очередь, интенсивностью протекания молекулярной и турбулентной

диффузии. При этом **результатирующая** скорость процесса горения будет определяться скоростью **наиболее медленного процесса.**

Если скорость протекания химической реакции между горючим и окислителем значительно ниже скорости образования горючей смеси, то результирующая скорость процесса горения лимитируется только скоростью химической реакции, т. е. процессами химической кинетики. Такое горение называется **кинетическим.**

Если же скорость подвода окислителя к горючему значительно меньше скорости химической реакции окисления, то результирующая скорость горения не зависит от скорости реакции и лимитируется только скоростью процесса смесеобразования, определяющим фактором которого является процесс диффузии кислорода к горючему. Такое горение называется **диффузионным.**

На рис.23 показана зависимость скорости горения от температуры и интенсивности процессов смесеобразования для различных условий горения.

Скорость протекания химических реакций между молекулами горючего и окислителя $W_{х.р}$ с увеличением температуры прогрессивно возрастает, согласно закону Аррениуса.

Скорость смесеобразования $W_{см}$ определяется процессами турбулентной и молекулярной диффузии и от температуры практически не зависит.

В области низких температур (на графике – T_1) скорость химической реакции значительно ниже скорости смесеобразования и, следовательно, результирующая скорость горения определяется **скоростью химической реакции**, т.е. горение протекает в **кинетической области.** Кинетическое горение обычно наблюдается при сравнительно низких температурах. При высоких температурах кинетическое горение может протекать только при условии очень интенсивного смесеобразования.

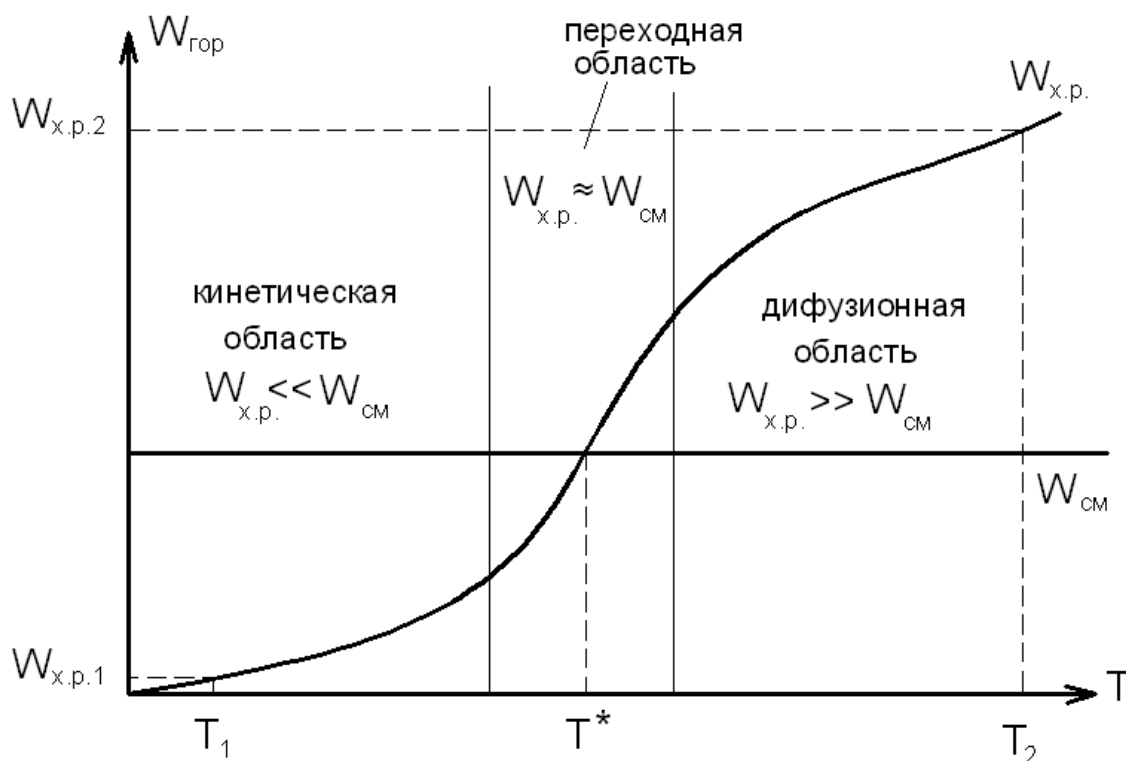


Рис.23. Кинетическая и диффузионная области горения

В области высоких температур (на графике – T_2) скорость смесеобразования значительно меньше скорости химической реакции, и результирующая скорость горения определяется **процессами смесеобразования**, т.е. горение протекает **в диффузионной области**. Диффузионное горение обычно наблюдается при сравнительно высоких температурах в зоне горения. При очень медленном смесеобразовании оно возможно и при сравнительно низких температурах.

Кроме кинетического и диффузионного горения, существуют такие условия, когда скорость химической реакции и скорость смесеобразования – величины одного порядка (температура T^*). Такое горение, определяемое как кинетическими, так и диффузионными процессами, называется промежуточным (переходная область).

Рассмотрим в качестве примера горение твёрдого топлива. Обычно в начальный период реакции, когда температура процесса ещё невысока,

скорость химической реакции мала, а в окружающем частицу объёме и у поверхности её имеется в избытке кислород. В этом случае процесс горения тормозится лишь **низкой скоростью химической реакции**, т.е. **кинетикой** реакции. Улучшение аэродинамики топки, интенсификация процесса подвода кислорода к горящей частице **не повлияют** на процесс горения. Следовательно, это область **кинетического** горения.

При высоких температурах в зоне горения химическая реакция протекает интенсивно и поглощает большое количество кислорода. Концентрация кислорода у поверхности частицы начинает интенсивно падать, и в дальнейшем скорость горения уже определяется **скоростью диффузии** кислорода в зону горения, которая практически не зависит от температуры, т.е. горение переходит в **диффузионную** область.

Возможность разделения процесса горения на крайние области - кинетическую и диффузионную - значительно упрощает изучение механизма горения, поскольку позволяет учитывать только фактор, определяющий итоговую скорость горения, пренебрегая другим.

7.5. Иная интерпретация «диффузионно-кинетического горения»

На практике процесс сжигания топлива осуществляется в устройствах (топках, печах, камерах сгорания и др.), отличающихся весьма сложными аэродинамическими характеристиками. При этом ни одно современное топочное устройство не совершенно с аэродинамической точки зрения, т.е. не может обеспечить идеальное (на молекулярном уровне) смешение топлива и окислителя (воздуха). При высоких температурах и концентрациях исходных компонентов (топливо и окислитель), при достаточной активности составляющих горючей смеси химическая реакция протекает, согласно закону Аррениуса, со столь значительной скоростью (скорость реакции пропорциональна величине $\exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$), что процессы смесеобразования

отстают по скорости протекания от химической реакции горения и тем самым тормозят процесс сжигания.

В общем случае, полное время горения $\tau_{\text{гор}}$ складывается из трёх составляющих:

- время, необходимое для возникновения физического контакта между горючим и окислителем (при сжигании газа – время смесеобразования) $\tau_{\text{см}}$;
- время нагрева горючей смеси до температуры воспламенения $\tau_{\text{наг}}$;
- время протекания самой химической реакции $\tau_{\text{хим}}$:

$$\tau_{\text{гор}} = \tau_{\text{см}} + \tau_{\text{наг}} + \tau_{\text{хим}}.$$

Рассмотрим случаи, когда тот или иной процесс (смесеобразование, нагрев, химическая реакция) становится определяющим фактором при определении суммарной скорости горения.

Если время смесеобразования несоизмеримо больше времени, необходимого для прогрева и протекания химической реакции, т.е. $\tau_{\text{см}} \gg \tau_{\text{хим}}$ и $\tau_{\text{см}} \gg \tau_{\text{наг}}$, то практически $\tau_{\text{гор}} = \tau_{\text{см}}$. Поскольку **процессы смесеобразования** определяются законами **молекулярной и турбулентной диффузии**, то подобный процесс называется **диффузионным горением**, т.е. это означает, что процесс горения протекает в **диффузионной области**.

Примером такого процесса является горение предварительно **не подготовленной** газовой смеси, т.е. в случае подачи газообразного топлива, не перемешанного с окислителем. При этом смешение происходит уже непосредственно в топочном объёме, а время образования горючей смеси значительно превышает время протекания химической реакции.

Развитый процесс горения, сопровождающийся, как правило, большим удельным тепловыделением, также протекает в диффузионной области, поскольку химическая реакция окисления горючих составляющих газа при высоких температурах протекает практически мгновенно.

Если время смесеобразования и время нагрева, наоборот, несоизмеримо меньше времени, необходимого для протекания химической реакции, т.е. $\tau_{\text{см}} + \tau_{\text{наг}} \ll \tau_{\text{хим}}$, то практически $\tau_{\text{гор}} = \tau_{\text{хим}}$. Таким образом, фактором, определяющим скорость горения, является скорость химической реакции, которая, в свою очередь, описывается законами **химической кинетики**. Это означает, что процесс протекает в **кинетической области**.

Примером кинетического горения является введение в топку заранее **подготовленной** гомогенной горючей смеси при температуре, близкой к температуре воспламенения. В начальный период времени, когда температура ещё невысока, горение также протекает в кинетической области.

Таким образом, организация процесса сжигания топлива в воздушном потоке может основываться на двух различных принципах: **кинетическом** и **диффузионном**.

Отличительной особенностью кинетического принципа является предварительная подготовка однородной смеси топлива и воздуха. Горение протекает в однородной среде при постоянном избытке воздуха ($\alpha_r = \text{const}$) и с постоянной теплопроизводительностью ($Q = \text{const}$).

8. Сжигание газообразного топлива

Газообразное топливо представляет собой смесь различных горючих и негорючих газов. Основными горючими составляющими большинства газообразных топлив являются предельные углеводороды: метан CH_4 , содержание которого в большинстве природных газов составляет 90÷98 % по объёму, этан C_2H_6 , пропан C_3H_8 , бутан C_4H_{10} , пентан C_5H_{12} , – а также водород H_2 , оксид углерода CO и сероводород H_2S (в редких случаях и в очень малых количествах). Преобладающее содержание метана в природных газах обуславливает близость их физических свойств и теплотехнических характеристик.

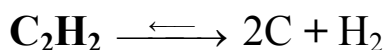
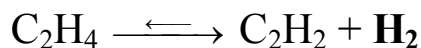
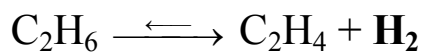
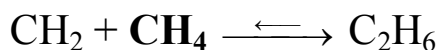
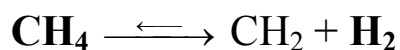
Теплота сгорания большинства природных газов находится в сравнительно узком диапазоне $Q_i^d = 8000 \div 9000$ ккал/м³ (33,5÷37,7 МДж/м³). (Для сравнения: теплота сгорания метана $Q_i^d = 8555$ ккал/м³). В негорючий балласт газообразного топлива могут входить азот N₂, двуокись углерода CO₂ и кислород O₂. Плотность природных газов близка к плотности основного компонента – метана – и изменяется, как правило, в узких пределах $\rho_r = 0,7 \div 0,8$ кг/м³.

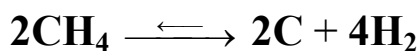
8.1. Механизм горения газа

Процесс горения газа протекает по-разному, в зависимости от теплофизических свойств отдельных компонентов. **Теплоустойчивые** компоненты, к которым относятся, например, CO и H₂, сохраняют свою молекулярную структуру при высокотемпературном нагреве без доступа воздуха. **Теплонеустойчивые** компоненты, например, большинство предельных углеводородов метанового ряда, при нагревании без доступа воздуха разлагаются с образованием более лёгких соединений и атомов углерода. Температура начала термической диссоциации углеводородов уменьшается с увеличением их молекулярной массы. Например, термическое разложение метана CH₄ начинается при температуре 600÷800 °С, этана C₂H₆ – при 485 °С, пропана C₃H₈ – при 400 °С.

Если количества окислителя не достаточно для полного окисления газа ($\alpha < 1$), или смесеобразование организовано плохо, то часть молекул газа, не имея контакта с молекулами окислителя, в зоне высоких температур подвергается термическому разложению с образованием более лёгких соединений и атомов углерода.

Пиролиз природных газов, содержащих некоторое количество тяжёлых фракций, начинается уже при температурах 300÷400 °С и протекает по сложной цепной схеме преобразований. Схему термического разложения метана можно представить в следующем виде:





Выделяющиеся в результате пиролиза атомы углерода имеют четыре свободные связи, отдельно не существуют и в зонах недостатка кислорода соединяются между собой, образуя твёрдые кристаллы графита – мельчайшие частицы сажи размером $0,3 \div 0,4$ мкм. В зоне активного горения они раскаляются, образуя **ярко светящийся факел**. Температура воспламенения газа несколько ниже температуры термического разложения углеводородов. Поэтому при хорошем смесеобразовании, когда все молекулы горючего вступают в контакт с необходимым для полного горения количеством молекул окислителя, образуется сравнительно небольшое количество углеродных частиц, которые, попадая в зону с достаточным содержанием кислорода, быстро сгорают. Поэтому длина светящейся части факела незначительна.

При ухудшенном процессе смешения горение твёрдых частиц сажи протекает медленно, затягивается. Факел получается длинным, растянутым. Некоторое количество сажи неизбежно попадает в зоны с недостатком кислорода и не сгорает, что приводит к потерям теплоты с **механическим недожогом**. Кроме того, на поверхностях нагрева образуется жирный налёт сажи, снижающий интенсивность теплообмена.

Количество сажи, которое может образоваться при термическом разложении углеводородного газа, зависит от отношения содержания углерода к водороду в топливе. Для газообразных топлив отношение C/H определяют по составу газа с учётом атомарных масс углерода (12) и водорода (1):

$$C/H = \sum \frac{12m}{1n} \cdot \frac{C_m H_n}{100} = 0,12 \sum \frac{m}{n} C_m H_n.$$

Для природных газов отношение $C/H = 3,0 \div 3,2$.

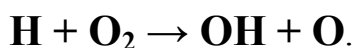
Результирующие реакции горения метана, водорода и оксида углерода не отражают фактического хода процесса горения. В действительности, механизм горения газа более сложен и характеризуется наличием ряда промежуточных химических преобразований, которые в целом представляют собой **разветвлённые цепные реакции**.

8.2. Механизм цепного горения метана

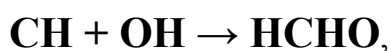
Если нагревание природного газа происходит в воздушной среде, то под действием кислорода метан сравнительно легко распадается с образованием неустойчивого радикала CH_3 и атомарного водорода:



Освободившийся при этом атом водорода реагирует с молекулой кислорода, в результате чего образуются гидроксильная группа **ОН** и атомарный кислород:



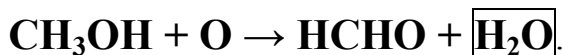
Затем возможны или дальнейшее отщепление водорода от радикала CH_3 с образованием **СН** и его взаимодействие с гидроксилом, в результате чего образуется неустойчивый **формальдегид**



или соединение радикала CH_3 с гидроксилом, сопровождающееся появлением сравнительно неустойчивого метилового спирта



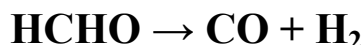
при окислении которого также образуется формальдегид



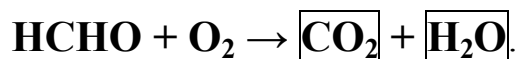
Формальдегид может также образоваться в результате непосредственного окисления радикала CH_3 :



Формальдегид легко распадается на оксид углерода и водород



или окисляется с образованием CO_2 и H_2O



Полнота, интенсивность и устойчивость горения газов, в первую очередь, зависят от температуры и условий смешения топлива и окислителя. Повышение температуры газовой смеси, согласно закону Аррениуса, вызывает увеличение скорости реакции пропорционально величине $e^{-E/(RT)}$. Отдельные горючие составляющие газообразного топлива, так же как и само топливо в целом, характеризуются температурой воспламенения, а также нижним и верхним концентрационными пределами.

Температура воспламенения основных горючих составляющих в смеси с воздухом: водород $410 \div 630^\circ\text{C}$, оксид углерода $610 \div 660^\circ\text{C}$, метан $630 \div 790^\circ\text{C}$.

Температура воспламенения природного газа около 530°C .

Под концентрационным пределом понимают соотношение газа и окислителя, при котором газозоветдушные смеси не горят. Концентрационные пределы зависят от ряда факторов (температуры, давления, содержания примесей и т.п.).

Для основных горючих компонентов нижний и верхний концентрационные пределы в смеси с воздухом, соответственно,

составляют: водород – 4 % и 74,2 %, оксид углерода – 12,5 % и 74,2 %, метан – 5 % и 15 %, природный газ – 4 % и 14 %.

Обогащение воздуха кислородом расширяет концентрационные пределы воспламенения.

8.3. Горелки для сжигания газа, их назначение и классификация

На интенсивность и полноту горения, а также на характеристики факела (размер, светимость, температурный уровень) первостепенное влияние оказывает фактор смешения газового топлива с окислителем. При недостаточно интенсивном перемешивании топлива с воздухом окислительные реакции тормозятся. При этом возможно появление продуктов неполного сгорания (химический недожог) и продуктов термического разложения углеводородов. Во избежание химического недожога при плохом перемешивании требуется увеличение коэффициента избытка воздуха в топке, что приводит к увеличению потерь теплоты с уходящими газами.

Сжигание топлива осуществляется с помощью устройств, называемых **горелками**. Они предназначены для подачи в топочную камеру (или в камеру сгорания) необходимых для достижения заданной производительности агрегата количеств топлива и окислителя, создания благоприятных условий их перемешивания (смешения) до начала горения или в самом процессе горения, воспламенения горючей смеси и стабилизации факела. Это достигается различными конструктивными приёмами.

Большинство газовых горелок, независимо от их типа, имеют общие конструктивные элементы: устройства для подвода газа и воздуха (топлива и окислителя), смесительную камеру, горелочную насадку и стабилизирующее

устройство. В зависимости от типа горелки, сферы её применения и технологических требований, каждый из перечисленных выше элементов горелки может иметь различное конструктивное оформление. Например, в некоторых конструкциях отдельные элементы могут совсем отсутствовать или компоноваться как единое целое.

Конструкция и аэродинамические характеристики горелочных устройств при сжигании такого высококалорийного топлива, каким является природный газ, имеют первостепенное значение, поскольку большая разница в объёмах воздуха и газа существенно затрудняет их перемешивание (в связи с высокой теплотой сгорания соотношение расходов воздуха и газа с учётом коэффициента избытка воздуха равно 10).

Кроме того, назначением горелки является **организация смесеобразования** и создание у её устья **устойчивого фронта воспламенения** для зажигания выходящей из горелки газозоудушной смеси.

Горение газа имеет принципиально различный характер, в зависимости от того, совмещены или разделены в пространственном отношении процессы смесеобразования, с одной стороны, и процессы подогрева смеси до температуры воспламенения и собственно горения – с другой стороны.

В зависимости от способа подачи в топочную камеру газа и окислителя (воздуха) и условий образования горючей смеси, различают три основных **принципа организации процесса горения** и соответствующие им **виды горелок**:

1) принцип **внешнего смешения**, когда газ и воздух подаются в зону горения **раздельно** (в виде отдельных струй или потоков), а смешение их происходит непосредственно за срезом горелки в пределах самого пламени за счёт эжектирующего действия струи или турбулентно-молекулярной диффузии (диффузионное горение) – **диффузионная горелка** – $\alpha_r = 0$ (рис. 24);

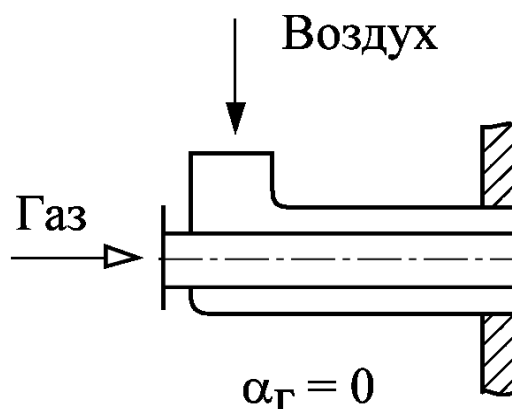


Рис. 24. Диффузионная горелка

2) принцип **полного внутреннего смешения**, когда газ со всем эжектируемым или принудительно подаваемым воздухом, необходимым для горения, смешивается непосредственно в пределах горелки, при этом в зону горения поступает **однородная** газовоздушная смесь (**кинетическое горение**) – горелка с **полным предварительным смешением** – $\alpha_G > 1$ (рис.25);

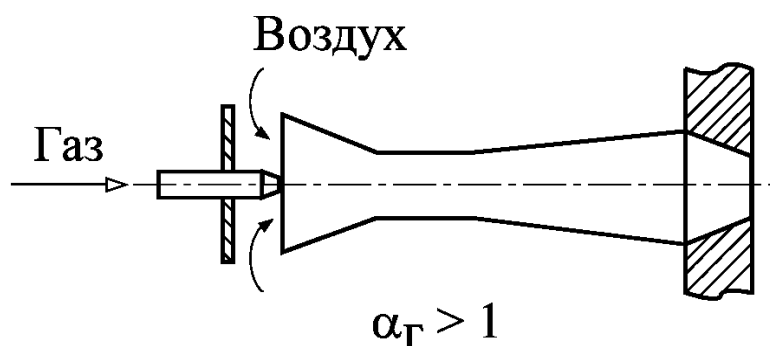


Рис. 25. Горелка с полным предварительным смешением

3) принцип **частичного внутреннего смешения**, когда газ смешивается в пределах горелки лишь с частью воздуха, необходимого для горения (**первичный воздух**), а остальная часть воздуха (**вторичный воздух**) подаётся в топку отдельным потоком. Окончательное смешение происходит уже в топочном объёме совместно с процессом горения – горелка с **частичным предварительным смешением** – $\alpha_G < 1$ (рис.26).

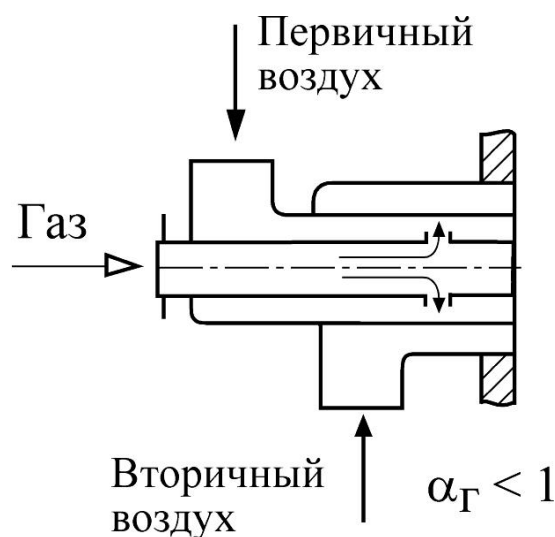


Рис. 26. Горелка с частичным предварительным смешением

Наряду с этими тремя основными принципами, возможен и очень часто практически реализуется **промежуточный**, или смешанный, принцип сжигания газа — принцип **неполного предварительного смешения**, когда предварительное смешение газа с воздухом находится на стадии неполного завершения (причём степень этой незавершённости может быть самой различной), т.е. в зону горения подаётся **неоднородная** газозвудушная смесь.

В зависимости от выбранного способа образования горючей смеси и соответствующей конструкции горелки, процесс сжигания газа может сопровождаться образованием **короткого** или **длинного** и **светящегося** или **несветящегося факела**.

При раздельной подаче топлива и воздуха (диффузионная горелка) или при условии их неполного или частичного предварительного смешения сгорание газа происходит в **растянутом факеле** по мере смешения газа с воздухом. Факел при этом, как правило, получается **светящимся** (особенно при сжигании газа с большим содержанием углеводородов и местном недостатке воздуха), что важно с позиции интенсивности лучистого теплообмена в топке. Горелки, образующие видимый факел, называются **факельными**.

При сжигании **предварительно подготовленной газовой смеси** процесс смешения завершается вне объёма факела. Поэтому горение в гомогенном факеле протекает интенсивно и полностью завершается на коротком участке, а факел получается **коротким и несветящимся**. При этом значительно повышается полнота сгорания, и уменьшается необходимый коэффициент избытка воздуха. Такие горелки условно называют **горелками предварительного смешения, или беспламенными**.

В **диффузионном факеле** процессы смешения и горения протекают одновременно в реакционном объёме, причём лимитирующим является процесс смесеобразования. Поэтому диффузионный факел оказывается значительно более протяжённым, чем гомогенный.

Размеры диффузионного факела регулируются изменением интенсивности смесеобразования путём варьирования конструктивных и режимных параметров горелки. В зависимости от технологических требований, можно добиваться укорочения или удлинения зоны смешения, т.е. изменять характеристики диффузионного факела.

В какой области протекает горение газа – в **кинетической** или **диффузионной**? Какой из двух основных факторов, характеризующих скорость процесса горения, является тормозящим, т.е. определяющим? Что замедляет процесс горения газообразного топлива – **скорость химической реакции**, т.е. кинетика, или **скорость смесеобразования**, т.е. диффузия?

Чтобы ответить на эти вопросы, необходимо определить интенсивность тепловыделения в зоне горения и время горения.

По модели Я.Б.Зельдовича тепловое напряжение в зоне реакции горения определяется по формуле:

$$\left(\frac{Q}{V}\right)_p = \frac{(u_n \rho_0 Q_i^d)^2}{2\lambda_0 \Delta T_p},$$

а время горения выделенного элементарного объёма в зоне реакции

$$\tau_p = 2 \frac{\Delta T_p}{T_a - T_0} \frac{a}{u_n^2},$$

где $u_n = 0,35$ м/с – нормальная скорость распространения пламени в неподвижной среде; ρ_0, λ_0 – плотность и теплопроводность газовой смеси на выходе из горелки; $\Delta T_p = 200 \div 300$ °C – повышение температуры в зоне реакции; T_a – теоретическая (адиабатическая) температура горения; T_0 – начальная температура газовой смеси; a – коэффициент температуропроводности смеси.

При хорошем молекулярном смешении газа с воздухом он горит при высоких температурах и с огромной скоростью:

$$\text{интенсивность тепловыделения} \quad \left(\frac{Q}{V} \right)_p > 10^6 \frac{\text{МВт}}{\text{м}^3},$$

$$\text{а время горения} \quad \tau_p < 10^{-3} \text{ с}.$$

К моменту воспламенения имеются участки, где газ и воздух сравнительно хорошо перемешаны. Тормозящим фактором, определяющим скорость процесса горения, является скорость протекания химической реакции, которая описывается законами химической кинетики, т.е. горение протекает в чисто **кинетической** области. Но интенсивность горения, а, следовательно, и потребление кислорода настолько велики, что готовая смесь быстро расходуется, и для поддержания процесса горения необходим более интенсивный подвод кислорода к зоне горения.

Кроме того, следует учесть тот факт, что с началом горения в смеси появляется третий компонент в виде продуктов сгорания. Происходит “разбавление” готовой смеси инертными компонентами, что затрудняет столкновение молекул топлива и окислителя.

Таким образом, при высоких температурах фактором, тормозящим скорость горения газа, является скорость процесса смесеобразования, описываемая законами молекулярной и турбулентной диффузии, т.е. горение протекает в **диффузионной** области.

Установлено, что при температуре около 1000 °С скорость кинетического горения достигает скорости смесеобразования в хорошо отлаженных горелках. Для дальнейшего увеличения скорости горения необходимо усовершенствование **аэродинамики горелок**.

Конструкция газогорелочных устройств, с помощью которых технически реализуются указанные принципы сжигания газа, должна быть органически связана с устройством всей топочной камеры в целом и, кроме того, должна обеспечивать выполнение следующих задач:

- подвод в зону горения требуемых количеств газа и воздуха;
- смешение газа с воздухом в соответствии с выбранным принципом сжигания;
- практически полное сгорание газа (за исключением некоторых частных случаев, когда для обеспечения технологического процесса в топочной камере необходимо получение восстановительной атмосферы, например, в промышленных печах);
- создание необходимого температурного уровня в зоне горения и в топочной камере в целом;
- обеспечение необходимой излучательной способности пламени.

Конструктивное разнообразие используемых в современной технике газовых горелок требует их классификации с разделением на отдельные, чётко различающиеся группы.

В основу такой классификации могут быть положены различные признаки. При этом ни один из классификационных признаков, взятый в отдельности, не может достаточно чётко охарактеризовать одновременно все принципиальные, конструктивные и эксплуатационные особенности газовых

горелок. В связи с этим в современной технической литературе отсутствует единая общепринятая классификация.

Горелки, предназначенные для комбинированного сжигания газа с другими видами топлива (мазут, угольная пыль), имеют ряд конструктивных особенностей.

Наряду с основополагающим принципом классификации горелок (**принцип образования горючей смеси**), существуют и другие подходы, или классификационные признаки:

- вид сжигаемого топлива;
- способ подачи воздуха;
- характер истечения потоков;
- форма устья горелки (геометрия);
- способ завихрения (крутки);
- способ регулирования крутки потоков;
- давление газа;
- скорость истечения;
- степень автоматизации;
- прочие.

По **способу подачи воздуха** горелки делятся на две группы:

- с принудительной подачей воздуха от вентилятора (**дутьевые горелки**);
- с подачей воздуха путём эжектирования его газовой струёй или за счёт разрежения в топке.

Дутьевые горелки, в свою очередь, в зависимости от характера истекающих потоков, подразделяются на **прямоточные** и **вихревые**.

В **прямоточных горелках** структура факела зависит от формы устья горелки, которая может быть **прямоугольной, щелевой** или **круглой**.

В вихревых горелках основополагающим является тип завихрителя (принцип организации крутки потоков), среди которых наиболее распространены улиточный аппарат (У) и лопаточные завихрители: тангенциальный (Т) и аксиальный (осевой) (А) (рис. 27).

Регулирование крутки потоков может осуществляться следующими способами:

- изменением угла наклона лопаток;
- изменением сечения входного патрубка или живого сечения лопаточных завихрителей;
- перепуском части воздушного потока мимо завихрителей (байпас).

Основные аэродинамические характеристики закрученных струй: профили скоростей (осевой, тангенциальной, радиальной), изменение максимальных скоростей вдоль оси струи, максимальная скорость обратного тока, количество газов рециркуляции, размеры зоны рециркуляции, распределение давления и другие параметры, – определяются, прежде всего, безразмерным интегральным параметром крутки n , который сохраняется постоянным вдоль струи.

Параметр крутки, геометрия горелки, соотношение скоростей и расходов первичного и вторичного воздуха – все эти характеристики оказывают существенное влияние на форму факела и угол его раскрытия, размеры зон рециркуляции дымовых газов, интенсивность тепло- и массопереноса и т.п.

Параметр крутки может быть рассчитан по конструктивным характеристикам соответствующего закручивающего аппарата.

а) улиточный

б) тангенциальный лопаточный

в) аксиальный лопаточный

Рис.27. Принципиальные схемы завихрителей

Наибольший практический интерес для топочной техники представляют следующие **характеристики закрученных струй**:

- распределение составляющих вектора скорости и распределение статических давлений по радиусу струи;
- падение максимальных скоростей по длине струи;
- размеры зоны обратных токов и объём газов рециркуляции;
- угол раскрытия и диаметр струи;
- увеличение массы струи.

Интенсификация процесса смешения горючего с окислителем может быть достигнута следующими способами:

- увеличение скорости потоков;
- подача потоков под углом друг к другу;
- дробление смешивающихся потоков на отдельные струи;
- использование стабилизаторов в виде стенки, плохо обтекаемого тела или суживающегося сечения;
- применение, так называемого, “острого дутья”, т.е. ввод с большой скоростью дополнительных струй воздуха, турбулизирующих основной поток;
- закручивание потоков воздуха.

8.4. Устойчивость (стабилизация) фронта воспламенения

Смесеобразование в факеле – процесс перемешивания горючего с окислителем до образования горючей смеси. Смесеобразование определяет характер протекания горения, длину, форму и излучающую способность факела, а самое главное, – полноту сгорания газа.

Как уже отмечалось, в зависимости от организации процесса (конструкции горелки) сжигание газа может сопровождаться образованием либо **короткого**, либо **длинного** факела. При раздельной подаче газа и

окислителя в топочную камеру сгорание, как правило, протекает в **растянутом светящемся факеле** по мере смешения компонентов. При сжигании предварительно подготовленной газовой смеси факел получается **коротким и несветящимся**.

Процесс смесеобразования отличается значительной сложностью, поскольку, как правило, процесс перемешивания газа и окислителя происходит при взаимодействии потоков, движущихся с различными скоростями под разными углами атаки и имеющих различные температуры, плотности и расходы (количество движения).

Особенно ощутимым является влияние процесса перемешивания на процесс горения при отдельной подаче (без предварительного смешения) в камеру сгорания топлива и окислителя. Такой способ образования горючей смеси осуществляется, например, когда воздух и (или) газ подогреваются до температуры воспламенения или близкой к ней. В таких случаях предварительное смешение невозможно, поскольку это вызвало бы преждевременное воспламенение смеси ещё до поступления её в камеру сгорания. Это диктует свои условия в области организации горелочного устройства и приводит к значительно более длинному факелу, чем в случае предварительно подготовленной смеси.

Основная задача конструирования рациональных газогорелочных устройств сводится к обеспечению возможности регулировать качество смешения и соответственно с этим изменять длину, форму и излучающую способность факела.

Интенсификация процессов смесеобразования в газовых горелках осуществляется, как правило, двумя путями:

- 1) дроблением потоков большого размера на более мелкие струи;
- 2) повышением масштаба и интенсивности турбулентности (переход к закрученным и пульсирующим потокам).

Воздействовать на процесс горения можно, в первую очередь, соответствующей организацией аэродинамики на начальном участке

формирования факела. Речь идёт об аэродинамике потока топочных газов и процессах турбулентного переноса тепла и массы, которые зависят от конструкции горелки и взаимного расположения горелок в топочной камере.

Каждая горелка в заданных пределах изменения производительности должна обеспечить устойчивое **зажигание и стабилизацию фронта воспламенения**. Под стабилизацией факела подразумевается создание условий, обеспечивающих надёжное горение факела без погасаний, пульсаций или отрыва от горелки.

Факел считается устойчивым, если при установившемся режиме подачи топлива он стабилизируется вблизи устья горелки и не меняет своего среднего положения в пространстве. Это состояние факела является результатом соответствующего взаимодействия скорости распространения пламени и противодействующей ей скорости потока газовойздушной смеси, вытекающей из устья горелки. Если скорость потока газовойздушной смеси превышает скорость распространения пламени, явление втягивания пламени в горелку, или, так называемого, **проскока** пламени, невозможно. При этом, если скорость истечения газовойздушной смеси чрезмерно высока, смесь не успевает в достаточной степени прогреться за счёт рециркуляции продуктов сгорания к корню факела, и происходит **отрыв факела** (погасание пламени).

На рис.28 показаны качественные **границы устойчивости пламени** в зависимости от степени аэрации горючей смеси, т.е. коэффициента избытка воздуха в горелке (доли первичного воздуха), и скорости истечения газовойздушной смеси.

Нижний предел устойчивости горения изменяется по кривой, напоминающей закон изменения скорости горения в зависимости от концентрации газовойздушной смеси. **Верхний предел устойчивого горения** с увеличением $\alpha_{гор}$ резко снижается.

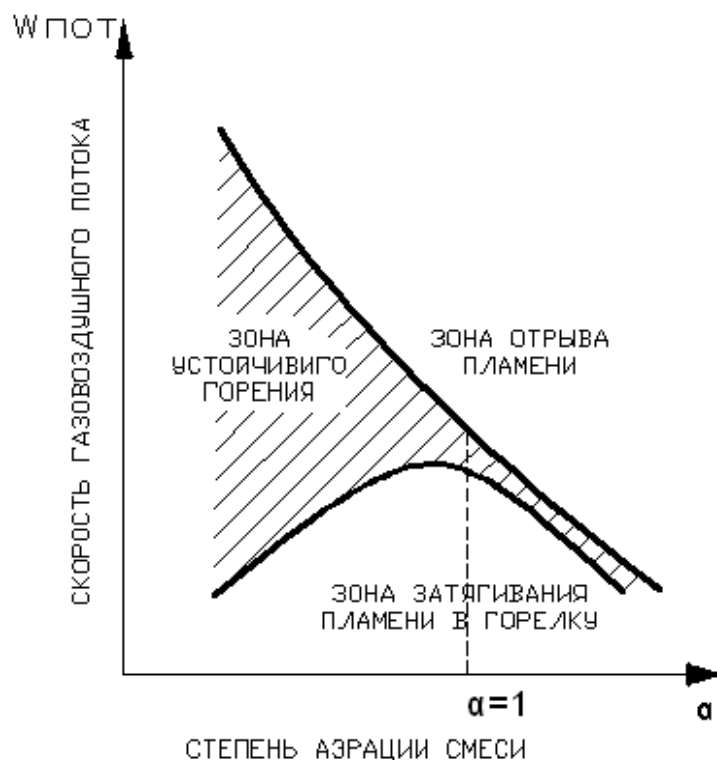


Рис. 28. Границы устойчивости пламени в зависимости от коэффициента избытка воздуха и скорости газовоздушного потока на выходе из горелки

Как видно, **устойчивое горение в широком диапазоне скоростей** наблюдается лишь **при малом количестве первичного воздуха** в исходной горючей смеси. В этом случае устойчивость горения обеспечивается хорошим источником воспламенения — **диффузионным факелом**, возникающим в камере при горении газа за счёт вторичного воздуха. С увеличением $\alpha_{\text{гор}}$ (доли первичного воздуха) пределы устойчивого горения сокращаются, так как влияние диффузионного фронта воспламенения нивелируется. При $\alpha_{\text{гор}} = 1$, т.е. когда диффузионное горение вообще отсутствует, горение смеси устойчиво лишь **в очень узком диапазоне** изменения скорости истечения газовоздушного потока.

В таких случаях для предотвращения отрыва пламени от горелки необходимо повысить температурный уровень в области воспламенения газовоздушной смеси, например, с помощью **закручивания** потоков,

обеспечивающего подсос раскалённых продуктов сгорания к корню факела в приосевой зоне – зоне **внутренней рециркуляции дымовых газов** (см. рис.14).

8.5. Особенности расчёта газовых горелок

Точный расчёт газовых горелок представляет собой задачу неоправданной сложности, поэтому практикой разработаны различные методы приближённого расчёта, которые дают вполне приемлемые результаты.

Большое распространение в энергетических установках получили газовые горелки, в которых воздушный поток поперечно пересекается мелкими струями газа, при этом газ может подаваться либо по центральной трубе (горелка типа “труба в трубе”) (рис.29а), либо с периферии (рис.29б).

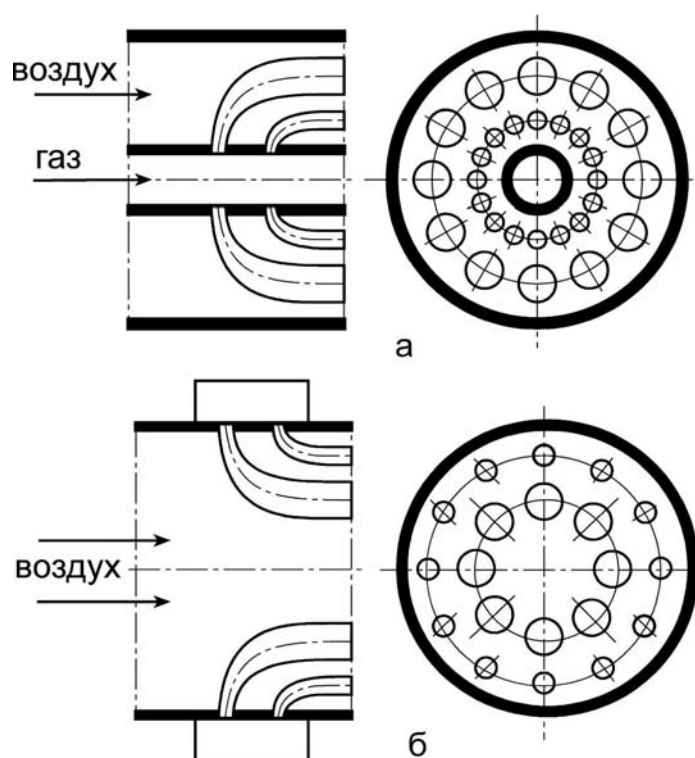


Рис. 29. Схемы подачи газа в поперечный поток воздуха:

а - по центру; б - с периферии

Струи газа по мере проникновения в поток воздуха будут сноситься этим потоком. При достижении определённого расстояния от стенки газового коллектора h осевая линия струи газа будет совпадать с направлением сносящего потока воздуха. Это расстояние называется **глубиной проникновения струи** в сносящий поток и зависит от диаметра сопла d_c вытекающей струи и отношения скоростей (W_z, W_e) и плотностей (ρ_z, ρ_e) газа и воздуха. Для более равномерного распределения газовых струй по сечению горелки и для лучшего смешения газа с воздухом газовые сопла выполняются в два ряда, причём первый (по ходу воздуха) ряд сопел имеет бóльший диаметр, чем второй.

Базовой формулой при расчёте таких горелок является полученная на основании многочисленных экспериментов Ю.В.Ивановым зависимость для определения относительной глубины проникновения газовых струй в поперечный поток воздуха:

$$\frac{h}{d_c} = K_s \frac{W_\Gamma}{W_B} \sqrt{\frac{\rho_\Gamma}{\rho_B}}, \quad (13)$$

где K_s – эмпирический коэффициент, зависящий от относительного шага между соплами, расположенными в одном ряду.

На рис.30 представлен примерный характер геометрии струй газа, истекающих в поперечный поток воздуха.

Под действием воздушного потока траектория струи искривляется, и сама струя становится шире за счёт диффузионного размытия. Отверстия (большие и малые сопла) для выхода газа должны быть расположены таким образом, чтобы струи в том сечении, где они принимают направление потока, перекрывали всё сечение.

При расчёте газовых горелок для определения глубины проникновения струи приходится предварительно задаваться значениями скоростей газа и воздуха, а также исходить из полученных опытным путём рекомендаций.

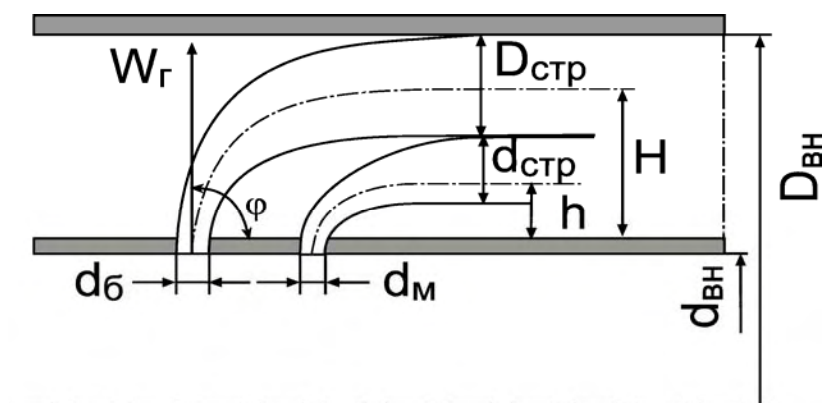


Рис. 30. Схема распространения струй газа в поперечном потоке воздуха

По уравнению расхода газа определяется внутренний диаметр газоподводящей трубы $d_{вн}$:

$$G_z = \frac{\pi d_{вн}^2}{4} W_{z.мп}.$$

Скоростью газа в трубе следует предварительно задаться. Рекомендуемые значения скорости $W_{z.мп} = 20\text{--}30$ м/с.

По уравнению расхода воздуха

$$G_v = \frac{\pi}{4} (D_{вн}^2 - d_n^2) \cdot W_v$$

определяется внутренний диаметр наружной воздухоподводящей трубы $D_{вн}$, после чего по соответствующему сортаменту труб выбирается подходящая труба (d_n – наружный диаметр газоподводящей трубы).

При расчёте глубины проникновения струй газа, истекающих из больших и малых сопел, исходят из предположения, что в том сечении, где

большие и малые струи принимают направление потока воздуха, они соприкасаются друг с другом, а внешняя граница больших струй достигает внешней границы кольцевого канала. При этом в сечении, где оси струй газа принимают направление потока воздуха, их условный диаметр, согласно опытным данным, составляет:

$$D_{cmp}=0,75H \quad \text{и} \quad d_{cmp}=0,75h .$$

Из схемы распространения струй в кольцевом канале (см. рис.30) следует, что **глубина проникновения больших струй**:

$$H + \frac{D_{cmp}}{2} = \frac{D_{вн} - d_n}{2} \rightarrow H + 0,375H = \frac{D_{вн} - d_n}{2} \rightarrow H = \frac{D_{вн} - d_n}{2,75} ,$$

а малых:

$$h + \frac{d_{cmp}}{2} = H - \frac{D_{cmp}}{2} \rightarrow h + 0,375h = H - 0,375H \rightarrow h = \frac{0,625}{1,375} H .$$

По формуле (13) определяются диаметры больших и малых сопел, при этом принимается $K_s=1,6$:

$$d_{\delta} = \frac{H}{K_s \frac{W_{\varepsilon}}{W_{\delta}} \sqrt{\frac{\rho_{\varepsilon}}{\rho_{\delta}}}} ; \quad d_m = \frac{h}{K_s \frac{W_{\varepsilon}}{W_{\delta}} \sqrt{\frac{\rho_{\varepsilon}}{\rho_{\delta}}}} .$$

Принимая, что, согласно рекомендациям, при центральной подаче газа 80 % его объёма подаётся через большие сопла, а 20 % – через малые, определяют геометрические характеристики горелки:

суммарная площадь больших и малых сопел

$$\sum f_{\delta} = 0,8 \frac{G_{\varepsilon}}{W_{\varepsilon}} ; \quad \sum f_m = 0,2 \frac{G_{\varepsilon}}{W_{\varepsilon}} ;$$

количество больших и малых сопел

$$n_{\bar{o}} = \frac{4 \sum f_{\bar{o}}}{\pi d_{\bar{o}}^2}; \quad n_m = \frac{4 \sum f_m}{\pi d_m^2};$$

шаг установки больших и малых сопел

$$S_{\bar{o}} = \frac{\pi d_n}{n_{\bar{o}}}; \quad S_m = \frac{\pi d_n}{n_m}.$$

Безразмерную длину факела можно определить по формуле Хоттеля:

$$\frac{L_{\phi}}{d_{\bar{o}}} = 5,3 \sqrt{\frac{T_a(1 + V_{\bar{o}}^0)}{\sigma \cdot T_z} \left(1 + \frac{\rho_{\bar{o}}}{\rho_z} V_{\bar{o}}^0 \right)},$$

где T_a – адиабатическая температура, T_z – начальная температура газа, σ – отношение количества молей продуктов горения к числу молей прореагировавших топлива и окислителя.

9. Механизм горения жидкого топлива

Жидкое топливо (в основном, мазут), несмотря на общие тенденции к сокращению его использования, находит пока ещё достаточно широкое применение в котельных установках промышленных предприятий. При этом скорость испарения увеличивается не только с интенсификацией подвода теплоты, но и с ростом относительной поверхности частиц (капель) топлива.

При поступлении жидкого топлива (например, мазута) в камеру сгорания (топочную камеру котла) в виде тонко распыленных мелких капель происходит быстрый прогрев капли за счёт тепла топочных газов, начинается её испарение с выделением лёгких парообразных и газообразных компонентов (горючих и негорючих). В первую очередь, испаряются лёгкие фракции. При этом температура воспламенения, а тем более горения, оказывается выше температуры кипения отдельных фракций, входящих в состав жидкого топлива. Поэтому вначале происходит испарение топлива с

поверхности за счет подводимой теплоты, а затем пары топлива смешиваются с воздухом, подогреваются до температуры воспламенения и горят. Таким образом, горение протекает в парогазовой фазе, о чём может свидетельствовать визуальное наблюдение за горением жидкого топлива с поверхности: видимое пламя никогда не касается поверхности, а отстоит от неё на некотором расстоянии.

Нагрев капли, в основном, определяется конвективной составляющей теплообмена и в меньшей степени – радиацией, при этом коэффициент конвективного теплообмена возрастает с уменьшением размера капли.

В области низких значений числа Рейнольдса ($Re < 1$) теплообмен при обтекании малой сферической капли при наличии испарения описывается критериальным уравнением:

$$Nu = 2 + 0,6 \cdot Re^{0,5} \cdot Pr^{0,33} \approx 2$$

или
$$Nu = \frac{\alpha d_k}{\lambda} = 2, \quad \text{т.е.} \quad \alpha = \frac{2\lambda}{d_k} = \frac{\lambda}{r_k}.$$

Таким образом, с уменьшением размера капли коэффициент теплоотдачи за счёт конвекции сильно возрастает.

Например, при температуре дымовых газов 1400°C (коэффициент теплопроводности газов $\lambda=0,144 \text{ Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)}$) для капли размером $d=100 \text{ мкм}$ коэффициент теплоотдачи

$$\alpha = \frac{\lambda}{r_k} = \frac{0,144}{50 \cdot 10^{-6}} = 2880 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}}.$$

Рассмотрим схему горения капли жидкого топлива (рис.31).

В процессе прогрева испаряющееся с поверхности капли топливо образует облако паров, которые диффундируют в окружающую среду, а навстречу этому потоку к поверхности частицы устремляется кислород. В результате, на некотором расстоянии от капли достигается стехиометрическое соотношение между горючими парами топлива и

кислородом, и происходит воспламенение смеси за счёт теплоты дымовых газов, температура которых превышает температуру воспламенения высококипящих фракций. Здесь и находится фронт горения паров топлива, образующий сферу вокруг капли.

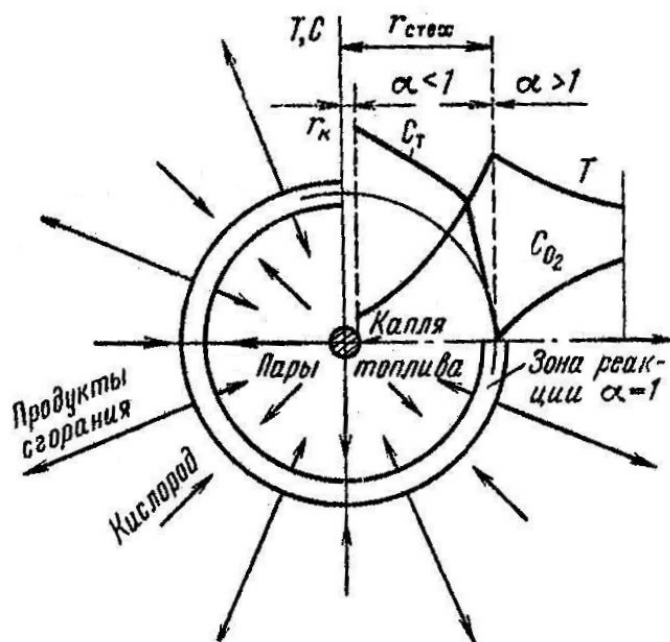


Рис. 31. Схема горения капли топлива

Таким образом, вокруг испаряющейся капли возникает полая сферическая поверхность горения, которая не соприкасается с самой каплей, причём размеры зоны горения $d_{гор}$ зависят от диаметра капли δ_k :

$$\frac{d_{гор}}{\delta_k} = 4 \div 10.$$

В зоне реакции устанавливается максимальная температура горения, которая затем снижается по обе стороны от фронта горения, при этом более интенсивное падение температуры наблюдается внутри сферы по мере приближения к капле (ввиду затрат теплоты на нагрев и испарение топлива).

Интенсивность горения капли жидкого топлива в целом определяется тремя факторами: скоростью испарения горючих фракций с поверхности капли, скоростью химической реакции и скоростью диффузии кислорода к

зоне горения. Скорость химической реакции в газовой фазе очень велика и не может тормозить скорость горения. Количество кислорода, диффундирующего к фронту горения, пропорционально квадрату диаметра шаровой поверхности, на которой протекает горение. Поэтому даже небольшое смещение зоны горения от поверхности капли заметно увеличивает поверхность фронта горения, а, соответственно, и массовый подвод кислорода. В начальный момент (до воспламенения), когда температура ещё недостаточно высока, наиболее медленным является процесс испарения фракций, интенсивность которого и определяет скорость горения капли жидкого топлива. При этом интенсивность испарения определяется не только температурой, но и величиной поверхности, т.е. степенью распыла топлива. После воспламенения температура у поверхности капли быстро увеличивается, интенсивность парообразования возрастает, а скорость горения лимитируется недостаточно интенсивным подводом кислорода.

Таким образом, в реальных условиях скорость горения жидкого топлива определяется двумя процессами: интенсивностью испарения и диффузией кислорода к зоне горения.

В начальной стадии горения при повышенных концентрациях топливных частиц пары топлива могут вытеснять воздух из межкапельного пространства. В результате образуются зоны с недостатком кислорода, и пары топлива при прогреве могут подвергаться коксованию с выделением сажи. Последующий процесс гетерогенного горения частиц сажи носит более затяжной характер и придаёт факелу яркий светящийся вид.

С помощью уравнения теплового баланса испарения капли (с учётом периода) за счет тепла, получаемого из зоны горения, в первом приближении можно рассчитать время выгорания капли:

$$\tau_r = \frac{\rho[(t_k - t_o)C_k + \chi]r_o^2}{2\lambda_r(t_r - t_k)}, \text{ с},$$

где ρ – плотность жидкого топлива, кг/м³; C_k – средняя теплоемкость жидкого топлива, кДж/(кг·°C); t_k – температура поверхности капли (практически равная температуре кипения капли), °C; t_0 – начальная температура жидкого топлива, °C; χ – теплота испарения жидкого топлива, кДж/кг; r_0 – начальный радиус капли жидкого топлива, м; t_r – температура окружающей газовой среды, °C; λ_r – теплопроводность газов, Вт/(м·°C).

Очевидно, что время полного испарения сильно зависит от начального размера капли. В одинаковых условиях капли грубого распыла требуют для испарения больше времени, что удлиняет факел и создаёт вероятность увеличения потерь с недожогом.

Структура образующегося факела при сжигании жидких топлив представлена на рис.32.

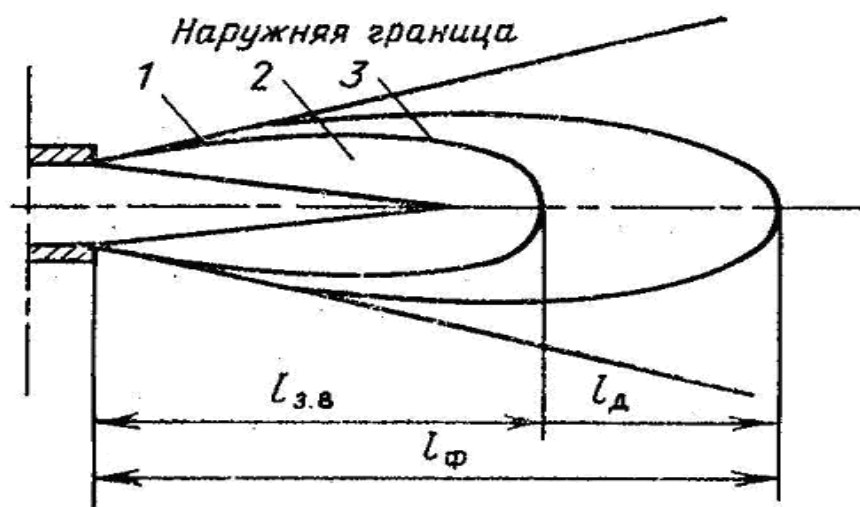


Рис. 32. Схема факела жидкого топлива:

1 – зона воспламенения; 2 – область испарения и образования горючей смеси;
3 – область догорания углеводородов; $l_{з.в}$ – длина зоны воспламенения;
 $l_д$ – длина зоны догорания; $l_ф$ – длина факела

Горение основной части парообразных углеводородов происходит в зоне воспламенения 1, ограничивающей наружный слой факела. Зона воспламенения условно делит пространство на две области: внутреннюю 2, в

которой протекают процессы испарения и образования горючей смеси, и наружную 3, из которой эжектируются воздух и горячие продукты сгорания.

Поскольку интенсивность испарения многократно увеличивается с ростом суммарной поверхности частиц, важнейшим этапом подготовки жидкого топлива к сжиганию является его распыление на мельчайшие частицы в специальных устройствах, называемых **форсунками**. Например, из капли диаметром 1 мм дроблением можно получить 10^6 капель диаметром 10 мкм. Площадь поверхности испарения при этом увеличивается в 600 раз.

При распылении жидкого топлива получаются капли различных размеров – от 5 до 500 мкм. Наиболее мелкие капли испаряются и воспламеняются первыми, способствуя испарению и воспламенению более крупных. При рассмотрении механизма горения жидкого топлива, следует помнить, что его горючая часть состоит из различных углеводородов, сжигание которых протекает с образованием промежуточных соединений и зависит от содержания окислителя в горючей смеси и температуры. При достаточном количестве окислителя образующееся из исходных углеводородов промежуточное соединение – формальдегид НСНО – либо легко распадается на водород H_2 и оксид углерода CO (которые, в свою очередь, окисляются до CO_2 и H_2O), либо окисляется с образованием двуокиси углерода и водяного пара (см. подразд. 8.2).

В реальных условиях отдельные участки факела имеют различные избытки воздуха и различную температуру. При недостаточном количестве окислителя после испарения происходит термическое разложение углеводородов. Характер этого процесса зависит от температуры. При относительно высоких температурах возможно образование тяжёлых высокомолекулярных углеводородных комплексов, вплоть до сажистого углерода



В этом случае горючая часть мазутного факела может представлять собой смесь лёгких паро- и газообразных углеводородов, тяжёлых жидких углеводородов и даже твёрдых частиц (сажи).

Для предотвращения процесса образования тяжёлых углеводородов и сажи воздух, необходимый для горения, следует подавать в корень факела, что способствует усилению окислительных реакций. Важное значение имеет также быстрое и тщательное смешение горючих компонентов факела с воздухом.

Для достижения этих целей используют вихревые турбулентные горелки. Сопоставление профилей осевой составляющей скорости (и, соответственно, формы факела) для осесимметричной незакрученной и закрученной струй представлено на рис.13. У незакрученной струи (см. рис.13, кривая *а*) зона воспламенения имеет форму конуса, основание которого находится вблизи устья форсунки (горелки), а вершина лежит на оси струи на значительном расстоянии от форсунки. У закрученной струи (см. рис.13, кривая *б*) в средней части факела (в приосевой области) происходит снижение давления, а при сверхкритической крутке (см. рис.13, кривая *в*) создаётся разрежение, за счёт которого в неё подсасываются (инжектируются) высокотемпературные продукты сгорания. В этом случае, наряду с воспламенением внешней поверхности струи, происходит также воспламенение и её внутренней поверхности, что обеспечивает более интенсивное протекание процесса горения.

9.1. Схемы распыления жидкого топлива. Мазутные форсунки

По способу распыления жидкого топлива **форсунки** можно разделить на три основные группы: **механические** (рис.33, 34, 35), **с распыливающей средой** (рис.36), **комбинированные** (рис.37).

Механические форсунки, в свою очередь, подразделяются на три вида:

- **прямоструйная** – распыливание осуществляется за счёт энергии топлива при продавливании его под значительным давлением через малое отверстие (сопло) (см. рис.33);

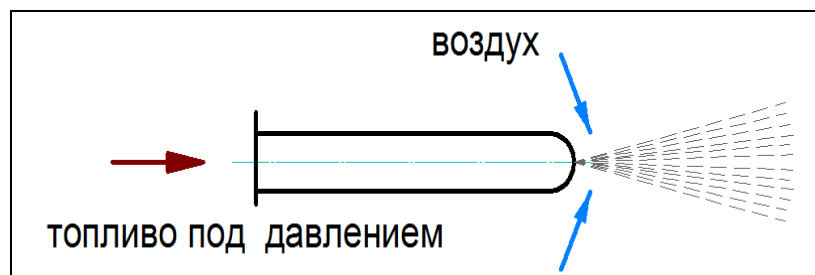


Рис. 33. Прямоструйная механическая форсунка

- **центробежная** – распыливание происходит за счёт центробежных сил, создаваемых при закручивании топлива (см. рис.34);

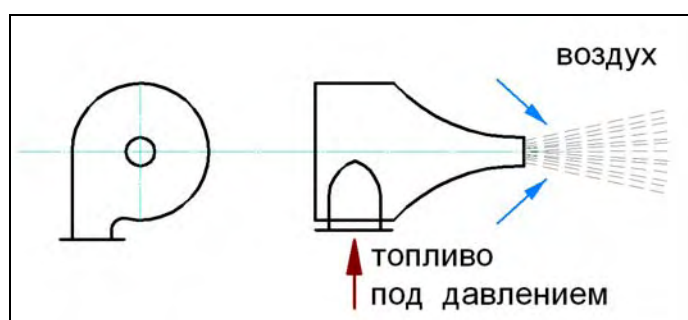


Рис. 34. Центробежная механическая форсунка

- **ротационная** – распыливание осуществляется при вращении элементов самой форсунки (см. рис.35).

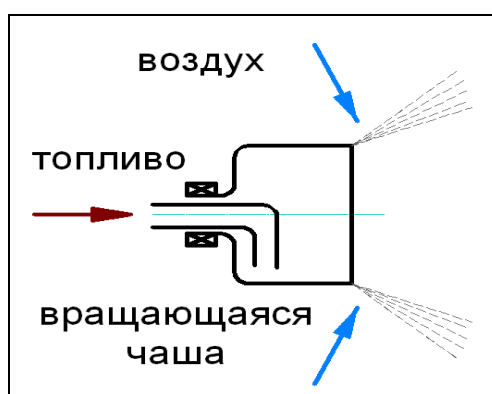


Рис. 35. Ротационная механическая форсунка

В механические форсунки мазут подаётся под давлением $2,0 \div 3,5$ МПа. Диаметр выходных отверстий $1,5 \div 3,5$ мм. Перед распыливанием для снижения вязкости мазут подогревается до температуры $90 \div 120$ °С (в зависимости от марки мазута). Дальнейшее размельчение полученных капель происходит под воздействием давления окружающей среды.

В форсунках с распыливающей средой распыливание осуществляется, главным образом, за счёт энергии движущегося с большой скоростью пара или воздуха (соответственно, **паровые** или **воздушные** форсунки) (см. рис.36).

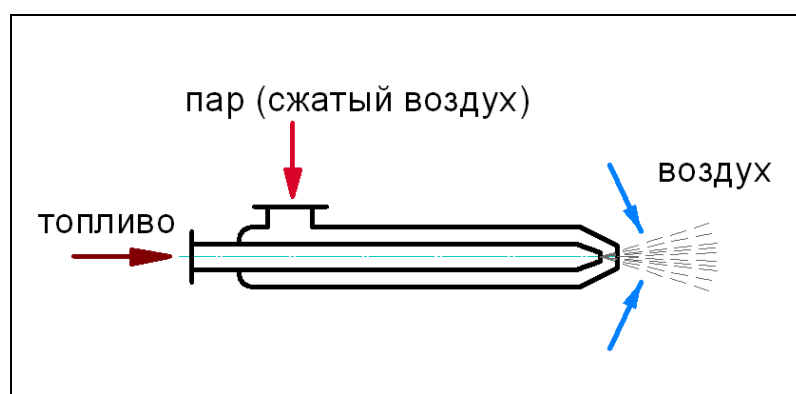


Рис.36. Форсунка с распыливающей средой

Для распыливания мазута **форсунками высокого давления** применяется либо **пар** (давление пара $P=0,5 \div 2,5$ МПа, расход пара $G=0,3 \div 0,35$ кг/кг мазута), либо **сжатый воздух** (давление $P=0,3 \div 0,6$ МПа, расход $G=0,6 \div 1$ кг/кг мазута).

В случае использования воздушного распыления через форсунку подаётся около $10 \div 15$ % воздуха, необходимого для горения. Скорость воздуха достигает 1000 м/с, чем обеспечивается хорошее дробление капелек мазута с получением тонкого распыла.

В форсунках с распыливающей средой низкого давления применяется **воздух** $P=0,002 \div 0,007$ МПа. При этом через форсунку подаётся от 50 % до 100 % воздуха, необходимого для горения.

В комбинированных форсунках (см. рис.37) распыливание топлива осуществляется за счёт совместного использования энергии топлива, подаваемого под давлением, и энергии распыливающей среды.

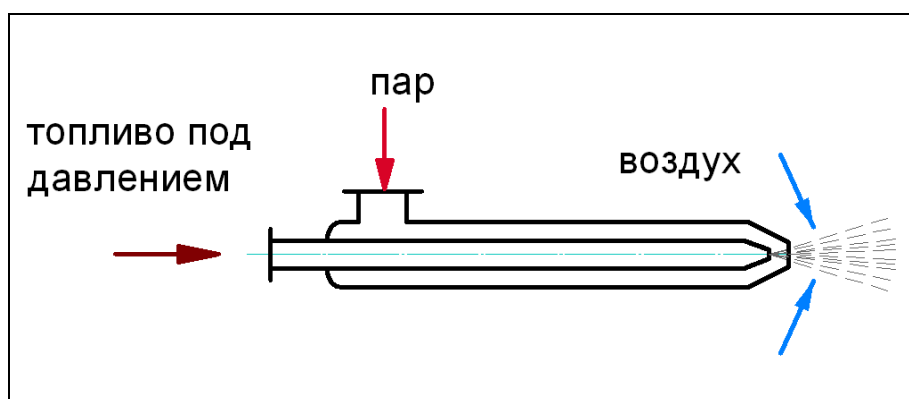


Рис. 37. Комбинированная форсунка

Достоинства механических форсунок:

- значительно меньший (примерно в 10 раз) расход энергии на собственные нужды;
- более компактны;
- создают при работе значительно меньший шум;
- не вызывает увеличения содержания водяных паров в продуктах сгорания, как это имеет место при использовании паровых форсунок;
- дают более короткий факел с большим углом раскрытия.

Недостатки механических форсунок:

- требуется более тонкая очистка мазута, что усложняет мазутное хозяйство;
- более грубое распыливание (при давлении мазута $P = 2$ МПа средний размер капель составляет 40 мкм, а при распылении паром с давлением $P = 1$ МПа – около 2 мкм);
- относительно малый диапазон изменения производительности (от 80 до 100 % по сравнению с 20 ÷ 100 % у паровых форсунок).

С учётом изложенного, для котлов средней и большой производительности при постоянной работе на мазуте, как правило, применяются **механические форсунки**, как наиболее экономичные.

Паровые форсунки используются для установок малой мощности, а также в качестве **растопочных**.

Основной недостаток механических форсунок – малый диапазон регулирования производительности. Устранение этого недостатка достигается применением комбинированного паромеханического распыливания мазута. **Комбинированные форсунки** при повышенных нагрузках котла работают как **механические**, а при малых нагрузках (менее 60 %), а также в пусковых режимах, в них подаётся пар.

10. Механизм горения твёрдого топлива

Процесс горения твёрдого топлива можно представить в виде ряда последовательно протекающих стадий. Вначале происходит прогрев топлива и испарение влаги. Затем при температуре выше 100 °С начинаются пирогенное разложение сложных высокомолекулярных органических соединений и выделение летучих веществ, при этом температура начала выхода летучих зависит от вида топлива и степени его углефикации (химического возраста). Если температура окружающей среды превышает температуру воспламенения летучих веществ, они загораются, тем самым обеспечивая дополнительный прогрев коксовой частицы до её воспламенения. Чем выше выход летучих, тем ниже температура их воспламенения, при этом тепловыделение увеличивается.

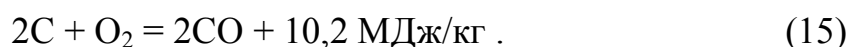
Коксовая частица прогревается за счёт тепла окружающих дымовых газов и тепловыделения в результате сгорания летучих и загорается при температуре 800÷1000 °С. При сжигании твёрдого топлива в пылевидном состоянии обе стадии (горение летучих и кокса) могут накладываться друг на друга, поскольку прогрев мельчайшей угольной частицы происходит очень быстро. В реальных условиях мы имеем дело с полидисперсным составом угольной пыли, поэтому в каждый момент времени одни частицы только

начинают прогреваться, другие находятся на стадии выхода летучих, а третьи – на стадии горения коксового остатка.

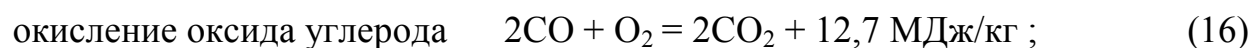
Процесс горения коксовой частицы играет решающую роль при оценке как суммарного времени горения топлива, так и суммарного тепловыделения. Даже для топлива с высоким выходом летучих (например, подмосковного бурого угля) коксовый остаток составляет 55 % по массе, а его тепловыделение – 66 % общего. А для топлива с очень низким выходом летучих (например, АШ) коксовый остаток может составлять более 96 % веса сухой исходной частицы, а тепловыделение при его сгорании, соответственно, около 95 % полного.

Исследования горения коксового остатка выявили сложность этого процесса.

При горении углерода возможны две **первичные** реакции прямого гетерогенного окисления:



В результате образования CO_2 и CO могут протекать две **вторичные** реакции:

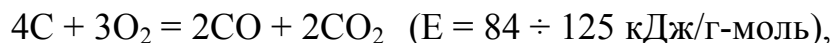


Кроме того, в присутствии водяных паров на раскалённой поверхности частицы, т.е. в высокотемпературной области, происходит газификация с выделением водорода:

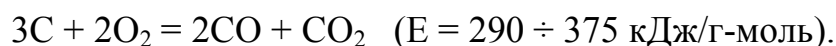


Гетерогенные реакции (14, 15, 17 и 18) свидетельствуют о непосредственном горении углерода, сопровождающемся убылью углеродной частицы в весе. Гомогенная реакция (16) протекает около поверхности частицы за счёт кислорода, диффундирующего из окружающего объёма, и компенсирует снижение температурного уровня процесса, возникающее как следствие эндотермической реакции (17).

Соотношение между CO и CO₂ у поверхности частицы зависит от температуры газов в этой области. Так, например, согласно экспериментальным исследованиям, при температуре 1200 °C протекает реакция



а при температуре выше 1500 °C



Очевидно, что в первом случае CO и CO₂ выделяются примерно в равных количествах, тогда как при повышении температуры объём выделившегося CO в 2 раза превышает CO₂.

Как уже было отмечено, скорость горения в основном зависит от двух факторов:

1) **скорости химической реакции**, которая определяется законом Аррениуса и стремительно растёт с увеличением температуры;

2) **скорости подвода окислителя** (кислорода) к зоне горения за счёт диффузии (молекулярной или турбулентной).

В начальный период процесса горения, когда температура ещё недостаточно высока, скорость химической реакции также невысока, а в окружающем частицу топлива объёме и у её поверхности окислителя более чем достаточно, т.е. наблюдается местный избыток воздуха. Никакое совершенствование аэродинамики топки или горелки, приводящее к интенсификации подвода кислорода к горящей частице, не повлияет на процесс горения, который тормозится только низкой скоростью химической реакции, т.е. кинетикой. Это – **область кинетического горения**.

По мере протекания процесса горения выделяется теплота, увеличивается температура, а, следовательно, и скорость химической реакции, что приводит к стремительному росту потребления кислорода. Концентрация его у поверхности частицы неуклонно падает, и в дальнейшем скорость горения будет определяться лишь скоростью диффузии кислорода в

зону горения, которая почти не зависит от температуры. Это – **область диффузионного горения**.

В **переходной области горения** скорости химической реакции и диффузии являются величинами одного порядка.

По закону молекулярной диффузии (закон Фика), скорость диффузионного переноса кислорода из объёма к поверхности частицы

$$W_{O_2} = \alpha_D (P_o - P_n), \quad (19)$$

где α_D – коэффициент диффузионного массообмена;

P_o и P_n – соответственно, парциальные давления кислорода в объёме и у поверхности.

Потребление кислорода у поверхности частицы определяется скоростью химической реакции:

$$W_{O_2} = kP_n, \quad (20)$$

где k – константа скорости реакции.

В переходной зоне в установившемся состоянии

$$\alpha_D (P_o - P_n) = kP_n,$$

откуда

$$P_n = P_o \frac{\alpha_D}{\alpha_D + k}. \quad (21)$$

Подставив (21) в (20), получим выражение для скорости горения в переходной области по расходу окислителя (кислорода):

$$W^{пер} = P_o \frac{\alpha_D k}{\alpha_D + k} = P_o \frac{1}{\frac{1}{k} + \frac{1}{\alpha_D}} = k_{эф} P_o, \quad (22)$$

где $k_{эф} = \frac{1}{\frac{1}{k} + \frac{1}{\alpha_D}}$ – эффективная константа скорости реакции горения.

В зоне сравнительно низких температур (кинетическая область) $\alpha_D \gg k$, следовательно, $k_{эф} = k$, и выражение (22) принимает вид:

$$W^{кин} = kP_o,$$

т.е. концентрации кислорода (парциальные давления) в объёме и у поверхности частицы мало отличаются друг от друга, а скорость горения практически полностью определяется химической реакцией.

С повышением температуры константа скорости химической реакции растёт согласно экспоненциальному закону Аррениуса (см. рис.22), в то время как молекулярный (диффузионный) массообмен слабо зависит от температуры, а именно

$$\alpha_D = A\sqrt{T}.$$

При некотором значении температуры T^* скорость потребления кислорода начинает превышать интенсивность его подвода из окружающего объёма, коэффициенты α_D и k становятся соизмеримыми величинами одного порядка, концентрация кислорода у поверхности начинает заметно снижаться, а кривая скорости горения отклоняется от теоретической кривой кинетического горения (закона Аррениуса), но ещё заметно возрастает. На кривой появляется перегиб – процесс переходит в промежуточную (переходную) область горения. Сравнительно интенсивный подвод окислителя объясняется тем, что за счёт снижения концентрации кислорода у поверхности частицы увеличивается разность парциальных давлений кислорода в объёме и у поверхности.

В процессе интенсификации горения концентрация кислорода у поверхности практически становится равной нулю, подвод кислорода к поверхности слабо зависит от температуры и становится практически постоянным, т.е. $\alpha_D \ll k$, и, соответственно, процесс переходит в диффузионную область

$$W^{диф} = \alpha_D P_o.$$

В диффузионной области увеличение скорости горения достигается интенсификацией процесса перемешивания топлива с воздухом (усовершенствование горелочных устройств) или увеличением скорости обдувания частицы потоком воздуха (усовершенствование аэродинамики топки), в результате чего уменьшается толщина пограничного слоя у поверхности, и интенсифицируется подвод кислорода к частице.

Как уже отмечалось, твёрдое топливо сжигается либо в виде крупных (без специальной подготовки) кусков (слоевое сжигание), либо в виде дроблёнки (кипящий слой и низкотемпературный вихрь), либо в виде мельчайшей пыли (факельный способ).

Очевидно, что наибольшая **относительная скорость** обдувания частиц топлива будет при слоевом сжигании. При вихревом и факельном способах сжигания частицы топлива находятся в потоке дымовых газов, и относительная скорость их обдувания значительно ниже, чем в условиях стационарного слоя. Исходя из этого, казалось бы, переход из кинетической области в диффузионную раньше всего должен происходить для мелких частиц, т.е. для пыли. К тому же ряд исследований показал, что взвешенная в потоке газовой смеси угольная пылинка так слабо обдувается, что выделяющиеся продукты сгорания образуют вокруг неё облако, сильно тормозящее подвод к ней кислорода. А интенсификация гетерогенного горения пыли при факельном способе предположительно объяснялась исключительно значительным увеличением суммарной реагирующей поверхности. ***Однако очевидное далеко не всегда является истинным.***

Подвод кислорода к поверхности определяется законами диффузии. Исследования по теплообмену малой сферической частицы, обтекаемой ламинарным потоком, выявили обобщённую критериальную зависимость:

$$Nu = 2 + 0,33Re^{0,5}.$$

Для малых коксовых частиц (при $Re < 1$, что соответствует скорости витания мелких частиц), $Nu \rightarrow 2$, т.е.

$$Nu = \frac{\alpha d_{\text{ч}}}{\lambda} \approx 2.$$

Между процессами тепло- и массопереноса существует аналогия, поскольку и те, и другие определяются движением молекул. Поэтому законы теплообмена (законы Фурье и Ньютона-Рихмана) и массообмена (закон Фика) имеют схожее математическое выражение. Формальная аналогия этих законов позволяет применительно к диффузионным процессам записать:

$$Nu_{\text{д}} = \frac{\alpha_{\text{д}} d_{\text{ч}}}{D} = 2,$$

откуда

$$\alpha_{\text{д}} = \frac{2D}{d_{\text{ч}}} = \frac{D}{r_{\text{ч}}}, \quad (23)$$

где D – коэффициент молекулярной диффузии (подобен коэффициенту теплопроводности λ в тепловых процессах).

Как следует из формулы (23), коэффициент диффузионного массообмена $\alpha_{\text{д}}$ обратно пропорционален радиусу частицы. Следовательно, с уменьшением размера частиц топлива процесс диффузии кислорода к поверхности частицы интенсифицируется. Таким образом, при сгорании угольной пыли переход к диффузионному горению сдвигается в сторону более высоких температур (несмотря на отмеченное ранее снижение скорости обдувания частиц).

Согласно многочисленным экспериментальным исследованиям, проведённым советскими учёными в середине XX в. (Г.Ф.Кнорре, Л.Н. Хитрин, А.С.Предводителев, В.В.Померанцев и др.), в зоне обычных топочных температур (около $1500 \div 1600$ °С) горение коксовой частицы смещается из промежуточной зоны в диффузионную, где большое значение имеет интенсификация подвода кислорода. При этом с увеличением

диффузии кислорода к поверхности торможение скорости горения начнётся при более высокой температуре.

Время сгорания сферической углеродной частицы в диффузионной области имеет квадратичную зависимость от начального размера частицы:

$$\tau_{\text{гор}} = \frac{\rho_{\text{ч}} R T_o^2}{\beta P_o D_o C_{O_2}^o T_m} r_o^2,$$

где r_o – начальный размер частиц; $\rho_{\text{ч}}$ – плотность углеродной частицы; D_o , P_o , T_o – соответственно, начальные значения коэффициента диффузии, давления и температуры; $C_{O_2}^o$ – начальная концентрация кислорода в топочном объёме на значительном расстоянии от частицы; β – стехиометрический коэффициент, устанавливающий соответствие весового расхода кислорода на единицу веса сжигаемого углерода при стехиометрических соотношениях; T_m – логарифмическая температура:

$$T_m = \frac{T_n - T_z}{\ln \frac{T_n}{T_z}},$$

где T_n и T_z – соответственно, температуры поверхности частицы и окружающих дымовых газов.

11. Экология в теплоэнергетике

Стремительный рост промышленного производства и потребления электроэнергии и тепла в XX и XXI вв. неуклонно сопровождается увеличением вредных выбросов, загрязняющих окружающую среду. Тепловые электростанции и котельные, потребляющие в огромных количествах твёрдое, жидкое и газообразное топливо, выбрасывают в атмосферу продукты сгорания, содержащие:

- золу;

- **оксиды азота;**
- **оксиды серы;**
- **оксид углерода** (в случае неполного сгорания топлива);
- **диоксид углерода** (вызывающий “парниковый” эффект).

Основой всех органических топлив является углерод, при полном сгорании которого образуется, казалось бы, “безвредный” газ – диоксид углерода CO_2 . Благодаря процессу фотосинтеза, протекающему в природе, зелёная растительность (деревья, кустарники и т.д.) при участии лучистой энергии Солнца разлагает углекислый газ и возвращает кислород в атмосферу. Неуклонное наращивание темпов потребления ископаемого органического топлива привело к нарушению природного баланса углекислого газа. Существующие на земной поверхности зелёные насаждения уже не справляются с гигантскими объёмами диоксида углерода, выбрасываемого в атмосферу. При сжигании органического топлива ежегодно выделяется около 21,3 Гт CO_2 , при этом лишь половина может быть поглощена природным процессам (фотосинтез и т.п.).

Рост концентрации CO_2 приводит к нарушению теплового баланса между Землёй и окружающей её атмосферой, космическим пространством, Солнцем и другими планетами. В результате этого дисбаланса происходит постоянное и повсеместное потепление климата планеты. Так называемый «парниковый» эффект зафиксирован климатологами ещё в XX в.

Мы все живём в едином пространстве, и границы между государствами не могут препятствовать “нарушению” этих границ газовыми выбросами. Поэтому проблема снижения выбросов (не только парниковых газов, и даже вообще не только газовых выбросов) является глобальной. К примеру, Россия поставляет в мировую атмосферную “помойку” лишь 4 % от общего мирового объёма выбросов CO_2 , а российские леса “перерабатывают” около 25 % суммарного мирового поступления углекислого газа.

Мировое соглашение (**Киотский протокол**, участником которого является и Россия) устанавливает жёсткие требования по ограничению выбросов CO₂. Согласно Киотскому протоколу, выбросы CO₂ в России не должны превышать уровня 1990 г., а в странах ЕЭС, например, 92÷94 % от уровня 1990 г.

Киотский протокол — международный документ, принятый в г. Киото (Япония) в декабре 1997 г. в дополнение к Рамочной конвенции ООН об изменении климата (РКИК). По состоянию на 14 февраля 2006 г. Протокол был ратифицирован 161 страной мира (совокупно ответственными за более чем 61 % общемировых выбросов).

Каковы же реальные мероприятия по снижению выбросов парниковых газов? В первую очередь, это разработка новых технологий по использованию возобновляемых источников энергии (ВИЭ): энергии Солнца, ветра, морских и океанских волн, приливов и отливов, геотермальных источников, водорода, биотоплива и т.д.

В последние годы в экономически развитых странах всё большее внимание уделяется развитию технологий по сжиганию так называемого **биотоплива**, к которому, в частности, относятся и продукты переработки древесины – **древесные гранулы** (пеллеты).

*Конечно, согласно закону сохранения энергии, для получения необходимого количества теплоты потребуется неизменное количество углерода (если речь идёт об углеродсодержащем топливе), при этом абсолютное количество выделившегося углекислого газа уменьшиться не может. Но дерево растёт несколько лет (или несколько десятков лет) и при этом “принимает активное участие” в процессе фотосинтеза, а для образования угля требуются миллионы лет. Очевидно, что при сжигании биотоплива снижается **относительное** количество выбросов CO₂.*

Наиболее токсичными из газообразных выбросов являются оксиды азота, поэтому проблема снижения их концентрации в уходящих газах энергетических котлов была и остаётся актуальной.

В зависимости от степени окисления образуются различные соединения азота с кислородом: гемиоксид N_2O , оксид NO , азотистый ангидрид N_2O_3 , диоксид NO_2 , тетраоксид диазота N_2O_4 и азотный ангидрид N_2O_5 . С экологической точки зрения, практическое значение имеют оксид и диоксид азота, сумму которых, как правило, обозначают как NO_x . Другие оксиды азота являются малоустойчивыми соединениями, вследствие чего присутствие их в земной атмосфере ничтожно мало.

Основным критерием санитарно-гигиенической оценки качества воздуха является концентрация в нём того или иного компонента. При этом различают среднегодовую, среднемесячную, среднесуточную, часовую и максимально разовую (отобранную в течение 20 мин) концентрации.

Согласно принятым в России нормативным документам, **предельно допустимая концентрация** диоксида азота $ПДК_{NO_2}$ в приземном слое воздуха составляет $0,085 \text{ мг/м}^3$, в то время как для оксида азота $ПДК_{NO} = 0,6 \text{ мг/м}^3$. При сгорании органического топлива образуется, главным образом, оксид азота NO , доля диоксида азота NO_2 составляет обычно $2 \div 5 \%$ суммарного содержания оксидов азота NO_x . Однако в шлейфе дымовых газов происходит дальнейшее окисление NO до более токсичного NO_2 , поэтому в директивных документах принято пересчитывать концентрацию NO в NO_2 .

Механизм окисления NO до NO_2 представляется в виде трёх возможных реакций:



Для обычных условий распространения шлейфа дымовых газов в нижних слоях атмосферы наибольшее значение имеет окисление NO озоном, т.е. реакция (24).

Результатом присутствия оксидов азота в атмосфере является их токсичное воздействие на здоровье людей, а также на животный и растительный мир. Даже кратковременное (до 1 ч) воздействие диоксида

азота в концентрации от 50 до 150 мг/м³ может вызвать воспаление лёгких и бронхит, а при концентрациях 500÷1000 мг/м³ возможен отёк лёгких и летальный исход.

Соединяясь с атмосферной влагой, оксиды азота образуют слабые растворы азотной и азотистой кислот, обуславливающие антропогенные выбросы не только оксидов азота, но и оксидов серы, в виде так называемых **кислотных дождей**. Пагубное воздействие кислотных дождей приводит к загрязнению почв и обеднению их растительными элементами, снижению продуктивности сельского хозяйства, увеличению кислотности водоёмов, гибели лесных массивов. Проблема кислотных дождей усугубляется ещё и тем, что в силу природных условий происходит трансграничный перенос оксидов азота и серы. В связи с этим решение проблемы на национальном уровне невозможно.

Ещё одна особенность токсичного воздействия оксидов азота заключается в снижении прозрачности атмосферы и образовании фотохимического тумана – **смога**. Это явление особенно проявляется в крупных мегаполисах с интенсивным автомобильным движением и, как следствие, с повышенной концентрацией углеводородов в воздухе.

Относительное суммарное вредное воздействие оксидов азота и диоксида серы, по принятым в России нормам, не должно превышать 1, т.е.

$$\frac{C_{\text{NO}_2}}{\text{ПДК}_{\text{NO}_2}} + \frac{C_{\text{SO}_2}}{\text{ПДК}_{\text{SO}_2}} \leq 1,0. \quad (27)$$

В табл. 1 приведены нормативы предельных выбросов в атмосферу оксидов азота для котельных установок.

Нормативы предельных выбросов в атмосферу оксидов азота NO_x
для котельных установок, введённые на ТЭС с 01.01.2001

Тепловая мощность котлов Q_t , МВт	Вид топлива	NO_x мг/нм ³ сух.газа ($\alpha=1,4$)	NO_x мг/МДж	NO_x кг/т. у.т.
100 - 299	Природный газ	125	43	1,26
	Мазут	250	86	2,52
	Бурый уголь	300	110	3,2
	Каменный уголь:			
	твёрдое шлакоудаление	470	170	4,98
	жидкое шлакоудаление	640	230	6,75
от 300 и выше	Природный газ	125	43	1,26
	Мазут	250	86	2,52
	Бурый уголь	300	110	3,2
	Каменный уголь:			
	твёрдое шлакоудаление	350	130	3,81
	жидкое шлакоудаление	570	210	5,97

11.1. Механизмы образования оксидов азота

Источником образования оксидов азота может быть либо молекулярный азот воздуха, используемый в качестве окислителя при сжигании топлива, либо азотсодержащие компоненты самого топлива. В соответствии с этим, оксиды азота делятся на **воздушные** и **топливные** (рис.38).

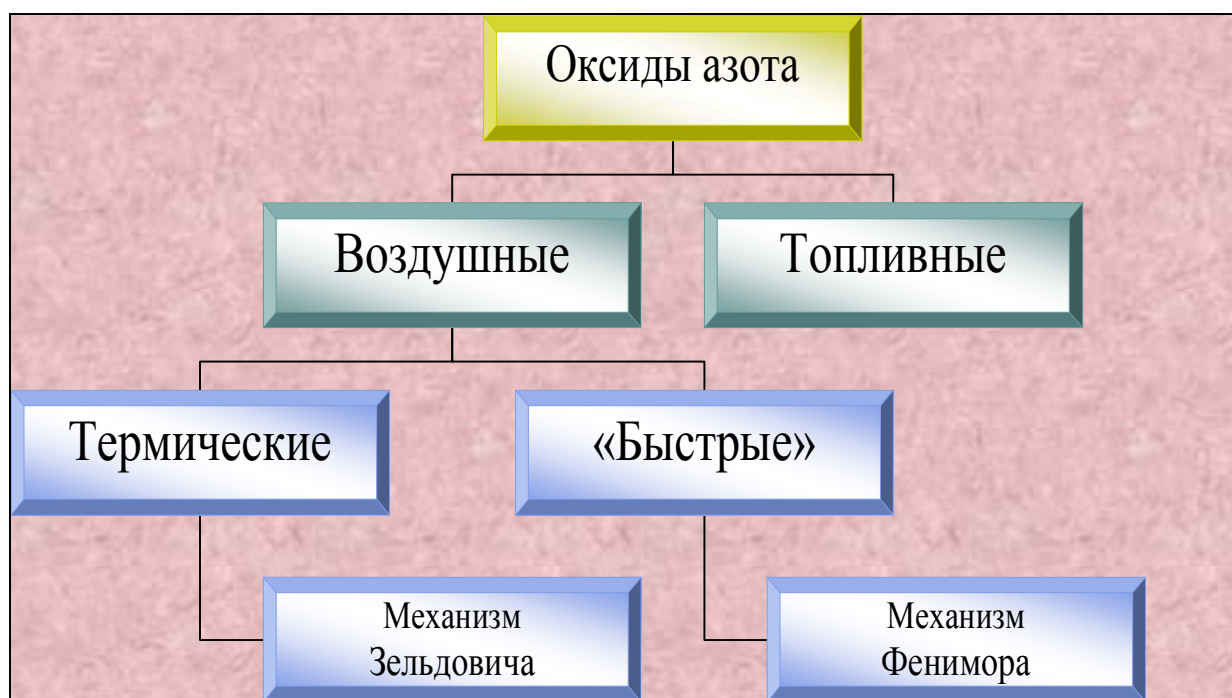


Рис. 38. Механизмы образования оксидов азота

При этом известны два механизма образования воздушных оксидов азота:

- окисление молекулярного азота атомарным кислородом при высоких температурах (механизм Зельдовича) – так называемые **термические** оксиды;

- протекающие непосредственно во фронте пламени (при сравнительно низких температурах) реакции разложения молекулярного азота под воздействием углеводородных радикалов с последующим взаимодействием атомарного азота с гидроксильной группой ОН (механизм Фенимора) – так называемые **“быстрые”** оксиды.

Относительная роль каждого из трёх источников образования NO_x определяется различными параметрами топочного процесса, температурой в зоне активного горения и содержанием связанного азота в топливе. Очевидно, что при сжигании природного газа, не содержащего связанного азота, нет смысла говорить о топливных оксидах азота. С другой стороны,

при сжигании углей в низкотемпературном вихре или в кипящем слое интенсивность образования термических оксидов ничтожно мала.

11.2. Методы снижения концентрации оксидов азота

Существуют два принципиально разных направления снижения выбросов токсичных газообразных веществ, в том числе оксидов азота:

- **пассивный способ** – очистка дымовых газов в специальных установках, смонтированных за котлом на участке между последней тепловоспринимающей поверхностью и дымовой трубой;
- **активный способ** – подавление процесса образования NO_x на начальном этапе их формирования.

Сравнительная оценка эффективности и экономичности двух подходов к решению данной проблемы однозначно указывает на целесообразность выбора активного способа снижения NO_x . При этом, вместо дорогостоящих и энергозатратных мероприятий по очистке дымовых газов, создаются условия, неблагоприятные, с точки зрения образования оксидов азота, и в то же время благоприятные, с позиции процесса воспламенения и горения топлива.

Очевидно, что основными параметрами, оказывающими первостепенное влияние на скорость и интенсивность образования NO_x , являются температура и содержание кислорода на начальном участке формирования факела, т.е. в околоторелочной области.

Изучение механизма образования NO_x показало, что при образовании **топливных** оксидов важнейшим фактором является концентрация кислорода в зоне сгорания летучих, а температура процесса играет второстепенную роль. Для **термических** оксидов азота, образующихся по механизму Зельдовича, наблюдается иная картина: температурный уровень является

основным показателем интенсивности образования NO_x , хотя и концентрация кислорода имеет также немаловажное значение.

Это обстоятельство предопределило главные направления борьбы с выбросами оксидов азота для котлов, работающих на разных видах топлива. При сжигании природного газа, не содержащего связанного азота, для снижения выбросов оксидов азота, необходимы мероприятия, которые бы снижали образование термических оксидов азота. При сжигании мазута в высокофорсированных топочных устройствах и при сжигании высококачественного угля в топках с жидким шлакоудалением, когда максимальные температуры в топке достигают $1650 \div 1750^\circ\text{C}$, снижение температуры в ядре горения также имеет важное значение, хотя не является столь же эффективной мерой снижения выбросов NO_x .

В настоящее время разработано большое количество технических решений, обеспечивающих снижение концентрации оксидов азота. Основные методы представлены на схеме (рис.39).



Рис. 39. Методы снижения выбросов оксидов азота

Рециркуляция газов приводит к снижению температуры, а, следовательно, и концентрации оксидов азота в дымовых газах. При сжигании газа, когда отсутствуют слабо зависящие от температуры топливные оксиды азота, эффективность рециркуляции газов весьма велика. Место ввода газов рециркуляции (в шлицы между горелками, в канал вторичного воздуха, под горелки и пр.) определяется избирательно в каждом конкретном случае. Ограниченность применения этого метода объясняется тем, что рециркуляция дымовых газов снижает экономические показатели (возрастают потери с уходящими газами и расход электроэнергии на собственные нужды). Также возникают дополнительные сложности в связи с необходимостью установки дымососа рециркуляции и коробов для подачи дымовых газов к горелкам.

Снижение максимума температур посредством **впрыска влаги** или уменьшения **температуры подогрева воздуха** может ухудшить стабильность воспламенения и эффективность сгорания угольной пыли.

Простейшим методом уменьшения содержания кислорода в факеле является **снижение избытка воздуха в горелках**. При этом сокращаются потеря теплоты с уходящими газами и расход электроэнергии на собственные нужды. Ограниченность применения этого метода объясняется тем, что при достижении некоторого критического значения α_{Γ} , которое зависит от вида топлива, способа сжигания, конструкции топки и горелки, образуются продукты химического недожога, а иногда и канцерогенного бенз(а)пирена $C_{20}H_{12}$.

Пылеугольным котлам характерна компоновка топки с большим количеством горелок, расположенных, как правило, в несколько ярусов. В результате, горелки и камера сгорания (топка) оказывают взаимное воздействие друг на друга. При многоярусном размещении горелок эффективным средством снижения выбросов оксидов азота может оказаться **нестехиометрическое сжигание** (рис.40).

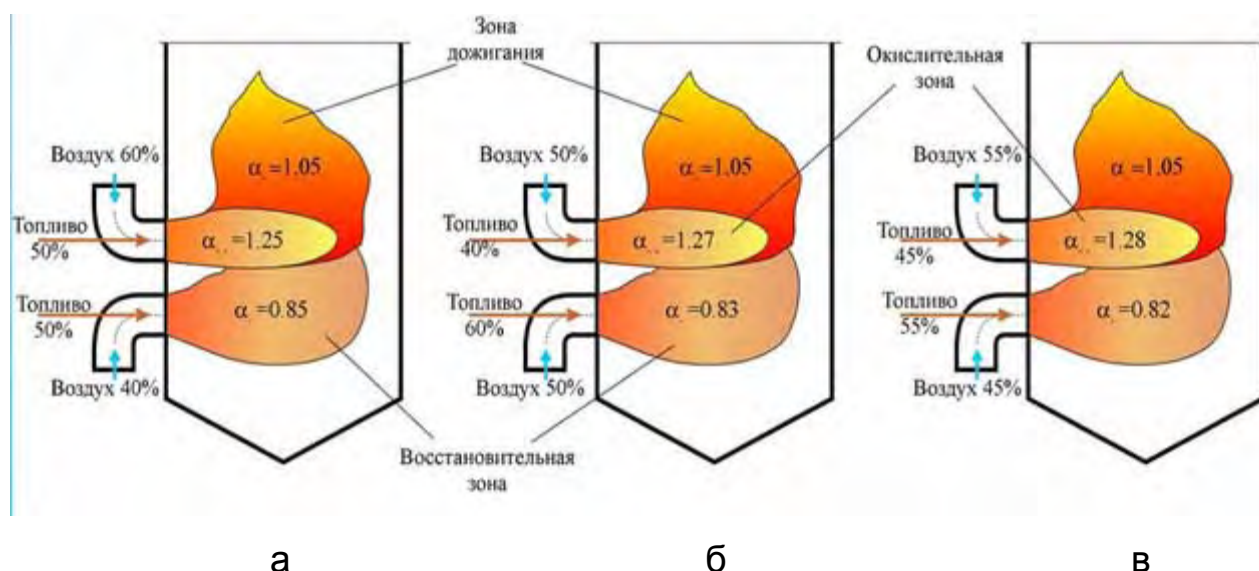


Рис. 40. Нестехиометрическое сжигание

а – воздушный разбаланс; б – топливный разбаланс;

в – комбинированный разбаланс

Нестехиометрическое сжигание организуется за счет **топливно-воздушного разбаланса** по горелкам или ярусам горелок: прикрытия индивидуальных воздушных шиберов (**воздушный разбаланс** – рис.40а) или топливных клапанов (**топливный разбаланс** – рис.40б) перед отдельными горелками. При этом в обоих случаях догорание топлива происходит при традиционных избытках воздуха после смешения продуктов сгорания из окислительной и восстановительной зон. Возможен также **комбинированный разбаланс** (рис.40в).

Разновидностью нестехиометрического сжигания является метод **ступенчатого сжигания**, когда через основные горелки подается только часть воздуха, а остальной необходимый для полного сгорания топлива воздух подается далее по высоте факела через специальные сопла.

На рис.41 представлена схема **двухступенчатого сжигания**.

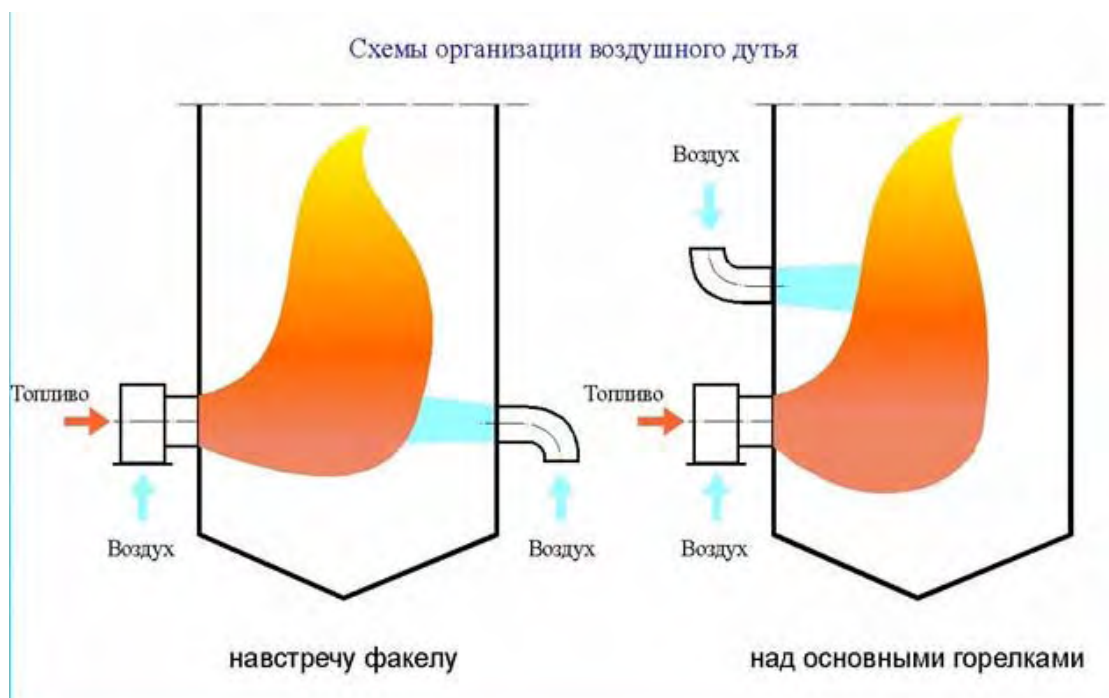


Рис. 41. Двухступенчатое сжигание топлива

В котлах с многоярусным расположением горелок в качестве сопел третичного дутья могут быть использованы горелки верхнего яруса (в том случае, если остальные горелки позволяют нести номинальную нагрузку). При этом на начальном участке факела воспламенение и горение летучих происходят при пониженной концентрации кислорода, в результате чего подавляются как топливные, так и термические оксиды азота. На второй ступени подавляются термические оксиды.

Такой ступенчатый подвод окислителя приводит к значительному снижению эмиссии NO_x . Одновременно, благодаря такому ступенчатому подводу воздуха, оксид углерода, образовавшийся в области нестехиометрического горения, окисляется до диоксида, тем самым снижая потери с химическим недожогом. Для снижения эмиссии оксидов азота оптимальный коэффициент избытка воздуха в зоне активного горения должен поддерживаться на минимально возможном уровне с тем, чтобы не благоприятствовать окислению топливного азота. Снижение коэффициента избытка воздуха не должно, однако, приводить к излишнему росту

концентрации оксида углерода и других продуктов химического недожога в дымовых газах.

Дальнейшим развитием метода ступенчатого сжигания является **трёхступенчатое сжигание** (рис.42):

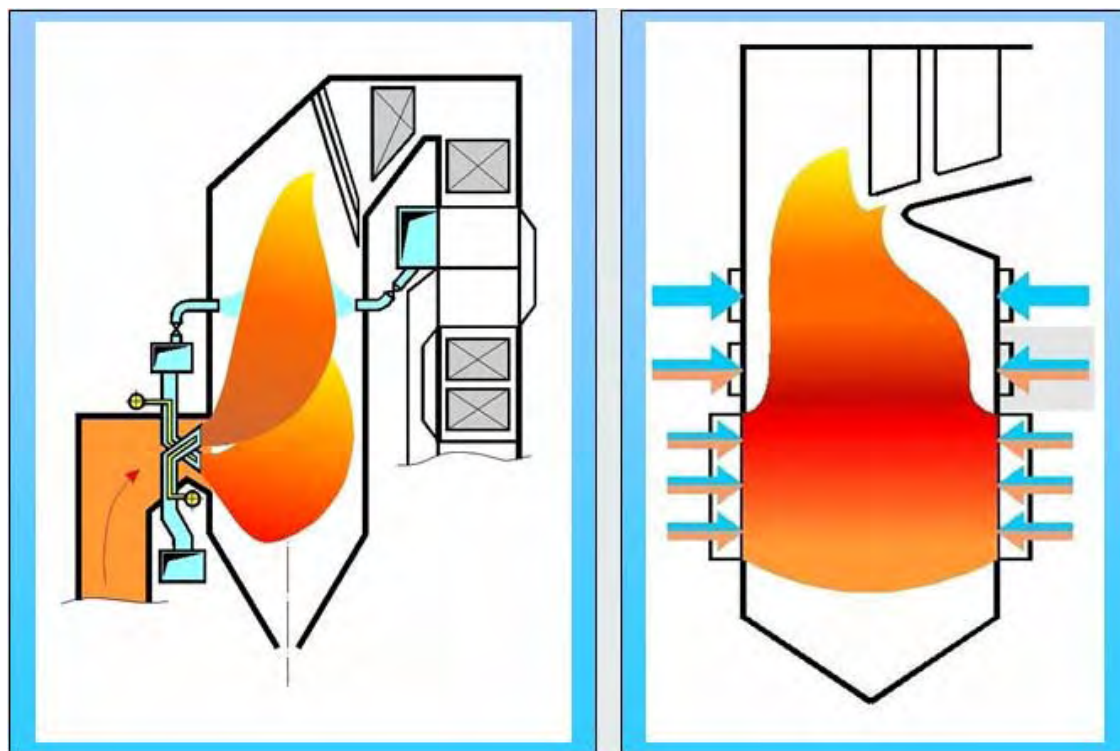


Рис. 42. Трёхступенчатое сжигание топлива

1 ступень – сжигание при избытках воздуха, близких к единице, при этом подавляются термические и топливные оксиды азота;

2 ступень – сжигание при избытках воздуха меньше единицы, при этом происходит восстановление оксидов азота, образовавшихся в 1 ступени, до атомарного азота;

3 ступень – зона догорания при избытках воздуха, равных избыткам воздуха на выходе из топки при традиционном сжигании.

11.3. Специальные конструкции горелок

Одним из перспективных направлений в области снижения эмиссии оксидов азота по праву считается применение специальных конструкций горелок, обеспечивающих торможение процесса образования NO_x .

Применение специальных конструкций горелок позволяет осуществить со сравнительно небольшими затратами (известно, что стоимость горелок не превышает 2 % от суммарной стоимости котла) комплекс технических решений, обеспечивающих торможение процесса образования оксидов азота и интенсификацию восстановительных реакций, в результате чего можно достичь заметного снижения выбросов оксидов азота.

Для снижения образования оксидов азота (при условии сохранения нормальной эксплуатации котла) конструкция горелки должна:

- затормозить в корне факела подмешивание богатого кислородом вторичного воздуха к воспламенившейся аэросмеси;
- интенсифицировать тепло- и массообмен между струёй аэросмеси и высокотемпературными топочными газами, содержащими мало кислорода, а также между вторичным воздухом и топочными газами;
- обеспечить эффективное сжигание топлива при минимально возможной доле первичного воздуха;
- снизить пик температур в ядре горения без ущерба для стабильности воспламенения и эффективности выгорания топлива.

Горелка, обеспечивающая снижение оксидов азота (рис.43), разработана на кафедре промышленной теплоэнергетики ЛТИ ЦБП (СПбГТУРП) научной группой под руководством профессора Р.С.Тюльпанова и внедрена в 1986 г. на Котласском ЦБК.

Отличительной чертой такой горелки является ступенчатый подвод вторичного воздуха по двум осесимметричным каналам, что позволяет регулировать процессы смесеобразования и горения. Внешний кольцевой канал для подвода вторичного воздуха разделяется на два кольцевых канала,

причём суммарная площадь сечения двух кольцевых каналов для подвода вторичного и третичного воздуха превышает первоначальное сечение канала вторичного воздуха. Это приводит к снижению скорости потока и, как следствие, к уменьшению коэффициента турбулентного обмена, что также замедляет скорость смесеобразования. Таким образом, осуществляется ступенчатый подвод окислителя, и на начальном участке формирования факела создаются условия нестехиометрического горения, т. е. пониженное содержание кислорода. Оставшийся необходимый для полного горения воздух подаётся по третичному кольцевому каналу, несколько отдалённому к периферии от оси горелки, окружает “богатую” смесь, обеспечивая полное догорание топлива.

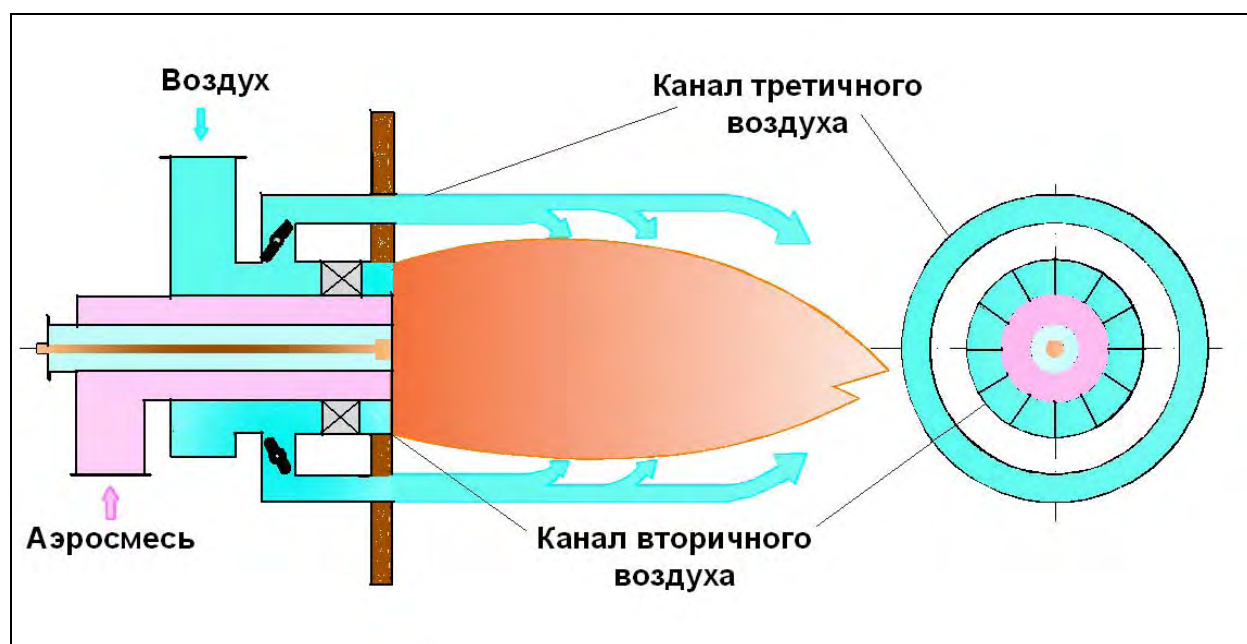


Рис.43. Горелка с затянутым смесеобразованием

Подобная горелка, в которой реализовано два принципа подавления оксидов азота: замедленное смесеобразование и ступенчатый подвод окислителя,— позволяет снизить концентрацию оксидов азота на 50 %.

Методические указания по расчёту выбросов оксидов азота с дымовыми газами котлов тепловых электростанций разработаны ведущими специалистами ВТИ и МЭИ в 2003 г.

Методические указания могут использоваться для расчета выбросов оксидов азота при проектировании новых и реконструкции действующих котлов **паропроизводительностью от 75 т/ч и водогрейных котлов мощностью от 58 МВт (50 Гкал/ч) и выше**, сжигающих твердое, жидкое и газообразное топливо в факельных горелочных устройствах.

Послесловие, или Post Scriptum

Вы ознакомились с кратким курсом «Топливо и теория горения». Почему «кратким»? Потому что предложенный материал не включает в себя целый комплекс теоретических и практических основ (распространение ламинарного и турбулентного пламени, аэродинамика струйного движения, системы пылеприготовления и многое-многое другое).

Надеюсь, «ознакомление» не ограничилось «вступлением», «послесловием» и «лирическими отступлениями». Но в любом случае более-менее глубокое познание предлагаемого материала требует серьёзных временных и трудовых затрат, особенно при условии непосещения лекций. Например, на лекциях «кинетическое и диффузионное горение» объясняется на примере популярных и всем известных гонок Формулы 1, а «классификация горелок по принципу смесеобразования» – с помощью приготовления коктейлей (безалкогольных, конечно). Описывать всё это в учебном пособии не представляется возможным.

Отсюда совет – посещайте лекции. И не «для галочки», а для получения знаний. Сегодня это тем более актуально, поскольку по иронии судьбы (или по чьей-то глупости) из учебной программы в 2010 г. исчезли лабораторные работы и практические занятия по данной дисциплине, которая объективно является одним из базовых курсов по специальности «Промышленная теплоэнергетика». И первые плоды этой глупости я пожинаю на протяжении первой же экзаменационной сессии – таких ужасающих результатов не припоминаю. Последние годы к экзамену допускались студенты, «вымуштрованные» Ольгой Сергеевной Смирновой, по крайней мере, по основным вопросам.

Конечно, можно было бы после каждого параграфа или раздела отметить эти самые «основные вопросы», на которые следует обратить особое внимание. Но ведь на лекциях я как раз на этом и делаю ударение. Объём материала по «Теории горения» практически неограничен. Но всё познать невозможно – часть материала даётся «для общего развития», или

для особо продвинутых и любопытных студентов. Таких немного, но они, к счастью, ещё встречаются.

Изложенный материал невозможно «выучить», да и не нужно – его надо «понять». С тем чтобы не ударить лицом в грязь и через год (а с основными понятиями вам ещё предстоит встретиться и на старших курсах), и через два (во время дипломного проектирования и защиты дипломного проекта), и по окончании учёбы (если вы собираетесь работать по специальности или продолжить учёбу).

А с просьбой получить конспект по курсу «Топливо и теория горения» в последние годы ко мне уже неоднократно обращались наши «вчерашние» выпускники, продолжающие свою профессиональную деятельность в ТГК-1 или, например, в Финляндии.

Как говорил культовый рок-музыкант (лидер группы “The Doors”, т.е. «Двери») Джим Моррисон: «На свете есть вещи понятные и непонятные, а между ними ... двери». Желаю вам, дорогие друзья, найти эти двери, которые соединят непонятную с первого взгляда тьму с очевидным светом. Удачи!

Белоусов В.Н.

Библиографический список

- Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй. - М.: Энергия, 1984.
- Акмен Р.Г. Топливо, основы теории горения и топочные устройства: текст лекций.- Харьков: НТУ «ХПИ», 2005.
- Алаев Г.П. Топливо и теория горения: учебное пособие/ЛТА.- Л., 1990.
- Белоусов В.Н., Смородин С.Н., Смирнова О.С. Основы сжигания газа: учебное пособие / СПбГТУРП.- СПб., 2009.
- Вулис П.А., Ярин Л.П. Аэродинамика факела.- Л.: Энергия, 1978.
- Гладышев Н.Н., Короткова Т.Ю., Иванов В.Д. и др. Справочное пособие теплоэнергетика жилищно-коммунального предприятия/ СПбГТУРП.- СПб., 2008.
- Григорьев К.А., Рундыгин Ю.А., Тринченко А.А. Технология сжигания органических топлив. Энергетическое топливо: учебное пособие.- СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2006.
- Двойнишников В.А., Деев Л.В., Изюмов М.А. Конструкция и расчёт котлов и котельных установок. - М.: Машиностроение, 1988.
- Долговский Н.М. Теплотехника и тепловое хозяйство электростанций. –Л.: ГЭИ, 1959.
- Зельдович Я.Б. Теория горения и детонации газов. – М.: Изд-во АН СССР, 1944.
- Иванов Ю.В. Основы расчёта и проектирования газовых горелок. - М.: Гостоптехиздат, 1963.
- Иссерлин А.С. Основы сжигания газового топлива: справочное руководство. - Л.: Недра, 1980.
- Кнорре Г.Ф. Топочные процессы. – М.-Л.: ГЭИ, 1959.
- Котлер В.Р. Оксиды азота в дымовых газах котлов. – М.: Энергоатомиздат, 1987.
- Лабейш В.Г. Введение в специальность. Теплоэнергетика: учебное пособие. - СПб.: Изд-во СЗТУ, 2007.

Липов Ю.М. Основы топочных процессов: конспект лекций. - М.: Энергия, 1969.

Ляховский Д.Н. Аэродинамика закрученных струй и её значение для факельного процесса сжигания газа. - Л.: Гостоптехиздат, 1958.

Мунц В.А., Павлюк Е.Ю. Основы теории горения топлива: учебное пособие. - Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2005.

Мурзаков В.В. Основы теории и практики сжигания газа в паровых котлах. - М.: Энергия, 1969.

Померанцев В.В. и др. Основы практической теории горения: учебное пособие для студентов высших учебных заведений. - Л.: Энергия, 1973.

Сидельковский Л.Н., Юренев В.Н. Котельные установки промышленных предприятий. - М.: Энегтоатомиздат, 1988.

Смородин С.Н., Иванов А.Н., Белоусов В.Н. Котельные установки и парогенераторы: учебное пособие / СПбГТУРП. - СПб., 2009.

Тюльпанов Р.С., Белоусов В.Н., Иванов А.Н. Разработка трёхканальной газовой горелки, позволяющей снизить эмиссию оксидов азота // Проблемы экономии топливно-энергетических ресурсов на промпредприятиях и ТЭС: межвуз. сб. науч.тр. / СПбГТУРП. - СПб., 1997. Вып.8.

Тюльпанов Р.С. Горелочные устройства в целлюлозно-бумажной промышленности: учебное пособие. - Л.: ЛТА, 1977.

Тюльпанов Р.С. Топочные процессы в целлюлозно-бумажной промышленности: учебное пособие. - Л.: ЛТА, 1977.

Хзмалян Д.М., Каган Я.А. Теория горения и топочные устройства. - М.: Энергия, 1976.

Частухин В.И., Частухин В.В. Топливо и теория горения. – Киев: Выща школа, 1989.

Шагалова С.С., Шницер И.В. Сжигание твёрдых топлив в топках парогенераторов. - Л.: Энергия, 1975.

Belousow W. Experimentelle Untersuchung und mathematische Beschreibung des brennernen Strömungsfeldes von Drallbrennern, Dissertation A, Dresden, 1990.

Belousow W., Krimmling J., Oelker J. Materielle und mathematische Modellierung von Feuerraum- und Flammenströmungen in Hinblick auf die Verbrennung von Problemkohlen. Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden, Heft 2, 1990.

Mathur M.L., MacCallum N.R.L. Swirling air jets issuing from vane swirlers. Part 1: free jets. Journal of the institute of fuel, (214).

Оглавление

1. Историческое развитие общих представлений о горении.....	3
2. Общие сведения о горении.....	4
3. Материальный баланс процесса горения.....	6
3.1. Материальный баланс процесса горения твёрдого и жидкого топлива.....	10
3.2. Материальный баланс процесса горения газа.....	14
3.3. Действительный объём воздуха и продуктов сгорания.....	17
4. Выбор оптимального значения коэффициента избытка воздуха в топке.....	19
5. Тепловой баланс процесса горения.....	26
6. Способы сжигания топлива.....	34
6.1. Слоеое сжигание.....	34
6.2. Факельное сжигание.....	39
6.2.1. Расположение горелок на стенках топочной камеры.....	42
6.3. Сжигание в кипящем слое.....	48
6.4. Вихревые топки.....	56
6.4.1. Высокотемпературное вихревое сжигание.....	56
6.4.2. Низкотемпературное вихревое сжигание.....	57
7. Основы кинетики процесса горения.....	62
7.1. Скорость реакции горения и её зависимость от концентрации реагирующих веществ.....	63
7.2. Энергия активации. Тепловой эффект реакции.....	68
7.3. Зависимость скорости реакции от температуры. Закон Максвелла - Больцмана. Закон Аррениуса.....	71
7.4. Зависимость скорости горения от физических и химических факторов. Кинетическое и диффузионное горение.....	75
7.5. Иная интерпретация «диффузионно-кинетического горения»....	78
8. Сжигание газообразного топлива.....	80
8.1. Механизм горения газа.....	81
8.2. Механизм цепного горения метана.....	83
8.3. Горелки для сжигания газа, их назначение и классификация....	85
8.4. Устойчивость (стабилизация) фронта воспламенения.....	95
8.5. Особенности расчёта газовых горелок.....	99
9. Механизм горения жидкого топлива.....	103
9.1. Схемы распыления жидкого топлива. Мазутные форсунки.....	109
10. Механизм горения твёрдого топлива.....	113
11. Экология в теплоэнергетике.....	120
11.1. Механизмы образования оксидов азота.....	125
11.2. Методы снижения концентрации оксидов азота.....	127
11.3. Специальные конструкции горелок.....	133
Библиографический список	136