

**В.Н. Белоусов, С.Н. Смородин, В.Д. Цимбал**

# **Топливо и процессы горения в теплоэнергетических установках**

**Часть 2**

**Учебное пособие**



**Санкт-Петербург  
2020**

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ДИЗАЙНА»**

---

**ВЫСШАЯ ШКОЛА ТЕХНОЛОГИИ И ЭНЕРГЕТИКИ**

**В.Н. Белоусов, С.Н. Смородин, В.Д. Цимбал**

**Топливо и процессы горения  
в теплоэнергетических установках**

**Часть 2**

**Учебное пособие**

**Санкт-Петербург  
2020**

УДК 662.6 (075)  
ББК 31.350.4  
Б 438

Белоусов В.Н., Смородин С.Н., Цимбал В.Д. Топливо и процессы горения в теплоэнергетических установках: учебное пособие / ВШТЭ СПбГУПТД.- СПб., 2020. Часть 2. – 151 с. – ISBN 978-5-91646-238-8.

В учебном пособии рассмотрены материальный и тепловой баланс процесса горения твёрдого, жидкого и газообразного топлива, способы сжигания топлива, конструкции топочных устройств, диффузионно-кинетическая теория горения, экологическая безопасность процессов горения.

Пособие составлено в соответствии с требованиями государственных образовательных стандартов, содержит необходимый нормативно-справочный и иллюстративный материал. Предназначено для получения базовых знаний и выполнения курсовых и выпускных квалификационных работ, связанных с процессами горения, студентами энергетических, политехнических и технологических вузов, обучающимися по направлению 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника».

Рецензенты: доктор технических наук, проректор по научной работе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого» В.В. Сергеев;  
кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника и теплотехника» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I В.И. Крылов.

Рекомендовано к изданию Редакционно-издательским советом ВШТЭ СПбГУПТД в качестве учебного пособия.

ISBN 978-5-91646-238-8

© Высшая школа технологии  
и энергетики СПбГУПТД, 2020  
© Белоусов В.Н., Смородин С.Н.,  
Цимбал В.Д., 2020

# 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 «*флогистоном*».

Великий русский ученый М.В. Ломоносов в 1756 г. положил начало современному научному представлению о горении как о процессе соединения горючего вещества с «тяжелыми частицами воздуха».

В 1773 г. французский ученый 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 ученый 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 учеными, такими как: Н.Н. Семенов, 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. Семенову и С. Хиншелвуду в 1956 г. была присуждена Нобелевская премия.

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

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

Эти работы, а также более поздние исследования ряда советских, российских и зарубежных ученых 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 ученым-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**

Среди химических реакций особый интерес для инженеров представляют процессы горения, поскольку эти процессы служат источником энергии для тепловых машин и двигателей внутреннего сгорания. Следующее краткое описание посвящено применению трех основных законов термодинамики к процессам горения:

*1. Закон сохранения массы.* С помощью этого закона по заданному количеству горючего можно определить необходимое для его сгорания количество образующихся газообразных продуктов сгорания.

*2. Первый закон термодинамики.* Химические реакции, особенно процесс горения, всегда связаны с превращениями энергии. «Химическая» энергия, т. е. энергия химических связей, освобождающаяся в процессе реакции в виде теплоты, является одним из важнейших источников энергии, который обеспечивает потребность в механической или электрической энергии.

*3. Второй закон термодинамики.* О термодинамическом совершенстве преобразования энергии в процессе химической реакции можно судить на основе второго закона термодинамики. Процессы горения в топочных устройствах или в двигателях внутреннего сгорания относятся к необратимым процессам, которые связаны с большими потерями энергии.

С помощью второго закона термодинамики можно установить, в каком направлении и в каких масштабах протекает химическая реакция.

Процессы горения представляют собой реакции различных веществ (большой частью С и Н<sub>2</sub>) с кислородом. В большинстве случаев в качестве носителя кислорода используется атмосферный воздух, в котором молярное содержание кислорода равно 0,21. Азот и остальные компоненты воздуха не реагируют с горючим, и поэтому во многих расчетах их можно не учитывать.

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. Ниже схематически показан процесс горения в топочном устройстве (рис. 2.1).

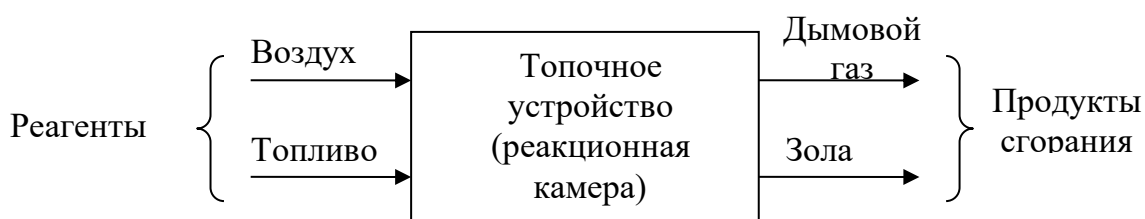


Рис. 2.1. Процесс горения в топочном устройстве

В реакции участвуют горючее и воздух; продукты реакции называются топочными (дымовыми) газами или газами сгорания. Кроме того, при сгорании образуется зола, состоящая из несгоревших или несгораемых компонентов горючих веществ. Без подвода воздуха сгорают взрывчатые вещества и виды топлива, которые сами имеют необходимый для реакции кислород в химически связанном или чистом (например, жидкий кислород в ракетах) виде.

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 ее 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 –  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ .

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 решетки.

Потери с **химическим недожогом** возникают в случае химически неполного окисления углеродсодержащих соединений с образованием окиси углерода  $\text{CO}$ , а также в случае, когда часть горючих газообразных веществ, образовавшихся при испарении и термическом разложении жидкого и твердого топлива ( $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$  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, обогащенный кислородом, или чистый кислород.

Расход кислорода  $V_{O_2}^0$  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

Материальный баланс процесса горения является одной из двух составных частей раздела «Статика горения», наряду с тепловым балансом. Вообще, что же такое *материальный баланс*?

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*), отнесенное к единице объема (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 дешевый газ, в котором содержится примерно 21 %



кислорода (по объему). 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 обозначать  $\text{NO}_x$ ). Но это уже другие реакции, которые к материальному балансу процесса горения отношения не имеют.

Материальный баланс процесса горения *твердого и жидкого* топлива составляется на *1 кг* топлива. Первоочередной целью материального баланса является определение теоретического объема воздуха, необходимого для полного сгорания топлива, а также теоретического объема продуктов сгорания. *Иными словами, необходимо определить, сколько кубометров воздуха надо подать в топку в пересчете на каждый килограмм топлива и сколько кубометров продуктов сгорания при этом образуется (опять-таки при сгорании 1 кг топлива).*

Определение объемов 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 расчета котла) соответствующего тягодутьевого оборудования: вентилятора и дымососа.

Поскольку речь зашла о тепловом балансе, сделаем небольшое отступление и начнем 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, передается в котле воде, превращая ее в пар (в случае парового котла).

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, выразить 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 определенное 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 расчетов 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 определенного количества заданного топлива, т. е. это произведение расчетного расхода топлива  $B_p$  (кг/с) на его удельную теплоту сгорания  $Q_i^f$  (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 определенных параметров (давление и температура). Это полезное тепло при выработке насыщенного пара, соответственно, получится (в упрощенном виде, без некоторых нюансов) умножением расхода пара  $D_{\text{нп}}$  (кг/с) на разность энтальпий насыщенного пара  $h_{\text{нп}}$  и питательной воды  $h_{\text{пв}}$ .

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 твердых топлив). Сумма этих потерь *определяет* величину КПД котла  $\eta_{\text{ка}}$ . Поэтому при составлении теплового баланса левую его часть необходимо умножить на КПД:

$$B_p Q_i^f \eta_{\text{ка}} = D_{\text{нп}} (h_{\text{нп}} - h_{\text{пв}}). \quad (3.1)$$

Из уравнения теплового баланса определяют расход топлива и, как уже отмечалось, с помощью материального баланса и аэродинамического расчета 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:

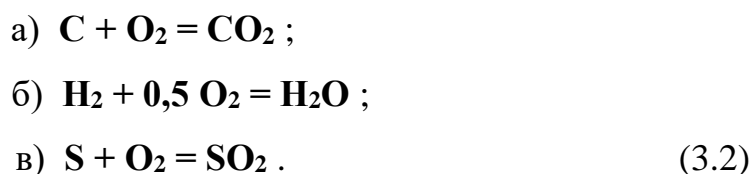
- определение объема воздуха, теоретически необходимого для полного сгорания топлива, и теоретического объема продуктов сгорания;

- определение действительных объемов воздуха и продуктов сгорания (с учетом коэффициента избытка воздуха).

Для твердого и жидкого топлива материальный баланс составляется на 1 кг топлива, для газообразного – на 1 м<sup>3</sup> сухого газа при нормальных условиях ( $P = 0,1013$  МПа,  $t = 0$  °С).

### 3.1. Материальный баланс процесса горения твёрдого и жидкого топлива

Горючие составляющие топлива вступают в химическое реагирование с кислородом в строго определенном количественном соотношении, определяемом из **стехиометрических уравнений** полного горения углерода, водорода и серы, записанных для 1 кмоль каждого горючего элемента:



При расчете объемов воздуха и продуктов сгорания условно принимают, что все горючие составляющие окисляются полностью, т. е. в соответствии с реакциями (3.2а, б, в).

Из уравнения (3.2а) следует, что для полного окисления одного моля углерода (молекулярная масса углерода  $\mu_{\text{C}} = 12$  кг) расходуется 1 моль кислорода и образуется 1 моль двуокиси углерода  $\text{CO}_2$ . Выразив газообразные составляющие ( $\text{O}_2$  и  $\text{CO}_2$ ) в объемных единицах (объем 1 моль любого газа при нормальных условиях составляет 22,4 м<sup>3</sup>), получим, что для полного сгорания 1 кг углерода потребуется

$$22,4/12 = 1,866 \text{ м}^3 \text{ O}_2,$$

при этом образуется 1,866 м<sup>3</sup>  $\text{CO}_2$ .

При известном составе рабочей массы в 1 кг топлива содержится  $(C^r/100)$  кг углерода, а для его полного сгорания необходимо:

$$1,866 \cdot (C^r/100) \text{ м}^3 \text{ O}_2,$$

и при этом образуется  $1,866 \cdot (C^r/100) \text{ м}^3 \text{ CO}_2$ .

Аналогично, из уравнения (3.2б) на окисление водорода ( $\mu_{\text{H}_2} = 2,02$  кг), содержащегося в 1 кг топлива, потребуется

$$0,5 \cdot (22,4/2,02) \cdot (H^r/100) \text{ м}^3 \text{ O}_2,$$

при этом образуется  $(22,4/2,02)(H^r/100) \text{ м}^3$  водяного пара, а, как следует из уравнения (3.2в), на окисление горючей серы ( $\mu_s = 32$  кг), содержащейся в 1 кг топлива, потребуется

$$(22,4/32) \cdot (S^r/100) \text{ м}^3 \text{ O}_2,$$

и образуется такой же объем  $\text{SO}_2$ . (Здесь и далее под  $S^r$  будет подразумеваться содержание горючей, или летучей, серы).

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

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

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

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

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

В результате полного сгорания топлива образуются газообразные продукты, которые состоят из  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{N}_2$ . Оксиды углерода и серы являются сухими трехатомными газами, которые принято объединять и обозначать  $\text{RO}_2 = \text{CO}_2 + \text{SO}_2$ .

При горении твердых и жидких топлив теоретические объемы продуктов сгорания вычисляются в соответствии со стехиометрическими уравнениями (3.2а,б,в) с учетом содержания соответствующих компонентов в топливе и воздухе.

**Теоретический объем трехатомных газов** в соответствии с уравнениями (3.2а,в):

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

**Теоретический объем азота** равен объему азота, поступившего с воздухом  $V_{N_2}^{\text{возд}}$ , и объему азота, выделяемого из топлива  $V_{N_2}^T$ :

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

*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 объем воздуха, легко определить теоретический объем азота, внесенного воздухом  $0,79V^0$ . Второе слагаемое, т. е. объем азота, внесенного с топливом, получается умножением массового содержания азота в топливе  $N^r/100$  на удельный объем азота, равный  $22,4/28 = 0,8 \text{ м}^3/\text{кг}$  (молекулярная масса азота  $\mu_{N_2} = 28 \text{ кг}$ ).*

**Теоретический объем водяного пара**  $V_{H_2O}^0$  складывается из следующих составляющих:

- водяные пары, образующиеся при сгорании водорода, входящего в состав топлива  $V_{H_2O}^H$  (реакция 3.2б);

- водяные пары, образующиеся при испарении влаги топлива  $V_{H_2O}^W$ ;

- водяные пары, вносимые в топку с окислителем (воздухом)  $V_{H_2O}^{\text{возд}}$ .

$$V_{H_2O}^0 = V_{H_2O}^H + V_{H_2O}^W + V_{H_2O}^{\text{возд}}.$$

Объем водяных паров, образующихся при сгорании водорода  $V_{H_2O}^H$ , определяется в соответствии со стехиометрическим уравнением (3.2б), т. е. при сгорании 1 моль водорода ( $\mu_{H_2} = 2,02$  кг) образуется 1 моль водяного пара (22,4 м<sup>3</sup>):

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

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

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

где  $\upsilon_{H_2O} = 22,4/18 = 1,24$  – удельный объем водяного пара, м<sup>3</sup>/кг.

Объем водяных паров, вносимых с воздухом, зависит от теоретического объема воздуха  $V^o$  и его влагосодержания  $d_b$ .

*Влагосодержание воздуха выражается в кг влаги на кг воздуха. Для перевода кг воздуха в м<sup>3</sup> необходимо умножить выражение на плотность воздуха  $\rho_b$ , а умножением на удельный объем водяного пара  $\upsilon_{H_2O}$  мы добиваемся перевода массовых долей пара в объемные.*

$$V_{H_2O}^{возд} = V^o d_b \rho_b \upsilon_{H_2O} = V^o \cdot 0,01 \cdot 1,293 \cdot 1,24 = 0,0161V^o, \text{ м}^3/\text{кг},$$

где  $d_b$  – влагосодержание воздуха (принимается  $d_b = 0,01$  кг влаги/кг воздуха),  $\rho_b = 1,293$  кг/м<sup>3</sup> – плотность воздуха при  $t = 0$  °С.

**В итоге теоретический объем водяных паров:**

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

При паровом распылении мазута теоретический объем водяного пара увеличивается на объем водяного пара, подаваемого в форсунку:

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

где  $G_\phi$  – удельный расход пара на распыление мазута, кг пара/кг мазута.

**Суммарный теоретический объем продуктов сгорания:**

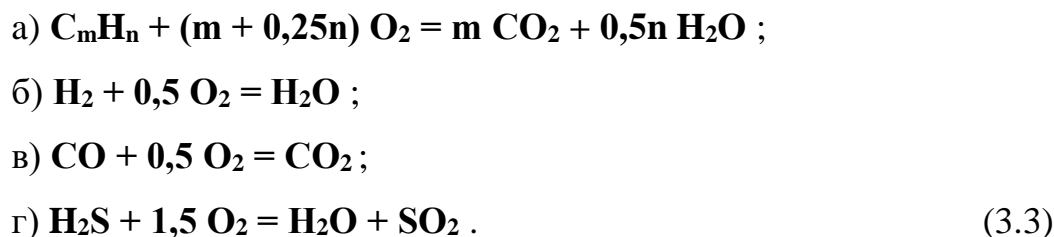
$$V_\Gamma^o = V_{RO_2}^o + V_{N_2}^o + V_{H_2O}^o, \text{ м}^3/\text{кг}.$$

### 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  $1 \text{ м}^3$  сухого газа при нормальных условиях.

Как уже отмечалось, горючие составляющие газа вступают в химическое реагирование с кислородом в определенном количественном соотношении, определяемом 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:



При расчете объемов воздуха и продуктов сгорания условно принимают, что все горючие составляющие окисляются полностью, т. е. в соответствии с реакциями (3.3а,б,в,г).

Из уравнения (3.3б), например, следует, что для полного окисления 1 моль водорода потребуется 0,5 моль кислорода, и образуется 1 моль водяного пара  $H_2O$ . Объем 1 моль любого газа при нормальных условиях – величина постоянная ( $22,4 \text{ м}^3$ ), следовательно, для полного сгорания  **$1 \text{ м}^3$  водорода** потребуется  **$0,5 \text{ м}^3$  кислорода**, при этом образуется  **$1 \text{ м}^3 CO_2$** .

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

$$0,5(H_2^T/100), \text{ м}^3 O_2 / \text{ м}^3 \text{ газа},$$



при этом объем образовавшихся водяных паров:

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

Аналогично определяется объем кислорода, необходимого для полного окисления углеводородов, из уравнения (3.3а)

$$\Sigma(m + 0,25n)C_mH_n^T,$$

оксида углерода из уравнения (3.3в)  $0,5CO^T$  и сероводорода из уравнения (3.3г)  $1,5H_2S^T$ .

Суммируя полученные выражения и учитывая кислород, который содержится в топливе  $O_2^T$ , получим выражение для определения объема кислорода, теоретически необходимого для полного сгорания  $1 \text{ м}^3$  газа,  $\text{ м}^3 O_2/\text{ м}^3$  газа:

$$V_{O_2}^o = 0,01(\Sigma(m + 0,25n)C_mH_n^T + 0,5H_2^T + 0,5CO^T + 1,5H_2S^T - O_2^T).$$

**Объем воздуха**, теоретически необходимого для полного сгорания  $1 \text{ м}^3$  газообразного топлива (с учетом концентрации кислорода в воздухе),  $\text{ м}^3$  воздуха/ $\text{ м}^3$  газа:

$$V^o = \frac{100}{21} V_{O_2}^o =$$

$$= 0,0476(\Sigma(m + 0,25n)C_mH_n^T + 0,5H_2^T + 0,5CO^T + 1,5H_2S^T - O_2^T).$$

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

Теоретические объемы продуктов сгорания вычисляются в соответствии со стехиометрическими уравнениями (3.3а,б,в,г) с учетом содержания соответствующих компонентов в топливе и воздухе.

**Теоретический объем трехатомных газов** складывается из следующих составляющих:

$V_{CO_2}^{C_mH_n}$  – объем  $CO_2$ , образовавшегося в результате сгорания углеводородов по реакции (3.3а);

$V_{CO_2}^{CO}$  – объем  $CO_2$ , образовавшегося в результате сгорания оксида углерода по реакции (3.3в);

$V_{\text{SO}_2}^{\text{H}_2\text{S}}$  – объем  $\text{SO}_2$ , образовавшегося в результате сгорания сероводорода по реакции (3.3з);

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

Таким образом, с учетом стехиометрических коэффициентов, теоретический объем трехатомных газов,  $\text{м}^3 \text{RO}_2/\text{м}^3$  газа:

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

**Теоретический объем азота** равен сумме объема азота, поступившего с воздухом  $V_{\text{N}_2}^{\text{ВОЗД}}$ , и объема азота, входящего в состав газообразного топлива  $V_{\text{N}_2}^{\text{T}}$ :

$$V_{\text{N}_2}^{\text{O}} = V_{\text{N}_2}^{\text{ВОЗД}} + V_{\text{N}_2}^{\text{T}} = 0,79 \cdot V^{\text{O}} + 0,01 \cdot N_2^{\text{T}}, \text{ м}^3 \text{N}_2/\text{м}^3 \text{газа.}$$

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

$V_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{C}_m\text{H}_n}$  – водяные пары, образующиеся при сгорании углеводородов по реакции (3.3а);

$V_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{H}_2}$  – водяные пары, образующиеся при сгорании водорода по реакции (3.3б);

$V_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{H}_2\text{S}}$  – водяные пары, образующиеся при сгорании сероводорода по реакции (3.3з);

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

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

Объем водяных паров, вносимых с воздухом, зависит от теоретического объема воздуха  $V^{\text{O}}$  и его влагосодержания  $d_{\text{В}}$ :

$$V_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{возд}} = V^{\circ} \cdot d_{\text{в}} \cdot \rho_{\text{в}} \cdot \upsilon_{\text{H}_2\text{O}} = 0,0161 \cdot V^{\circ}, \text{ м}^3 \text{ H}_2\text{O}/\text{м}^3 \text{ газа},$$

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

$\rho_{\text{в}} = 1,293$  кг/м<sup>3</sup> – плотность воздуха;

$\upsilon_{\text{H}_2\text{O}} = 22,4/18 = 1,24$  м<sup>3</sup>/кг – удельный объем водяного пара.

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

$$V_{\text{H}_2\text{O}}^{\circ} = V_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{C}_m\text{H}_n} + V_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{H}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{H}_2\text{S}} + V_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{T}} + V_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{возд}} =$$

$$= 0,01(\sum 0,5n \text{ C}_m\text{H}_n^{\text{T}} + \text{H}_2^{\text{T}} + \text{H}_2\text{S}^{\text{T}}) + 1,24 d_{\text{г}} + 0,0161 V^{\circ}, \text{ м}^3 \text{ H}_2\text{O}/\text{м}^3 \text{ газа}.$$

**Суммарный теоретический объем продуктов сгорания:**

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

### 3.3. Действительные объёмы 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 объем воздуха, полученный из стехиометрических уравнений горения.

Как уже отмечалось, отношение действительного объема воздуха  $V$  к теоретически необходимому  $V^{\circ}$  называется коэффициентом избытка воздуха

$$\alpha = \frac{V}{V^{\circ}} = \frac{V^{\circ} + V^{\text{изб}}}{V^{\circ}} = 1 + \frac{V^{\text{изб}}}{V^{\circ}}.$$

Таким образом, действительный объем 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 объем продуктов сгорания будет больше теоретического за счет азота, кислорода и водяного пара, содержащихся в избыточном воздухе.

Так как воздух практически не содержит трехатомных газов, то их объем не зависит от коэффициента избытка воздуха и остается постоянным, равным теоретическому:

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

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

**Объем двухатомных газов** включает в себя теоретический объем азота и избыточный воздух:

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

**Действительный объем водяных паров** увеличивается (по сравнению с теоретическим) на количество водяных паров, внесенных с избыточным воздухом:

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

**Суммарный объем продуктов сгорания:**

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

## 4. Выбор оптимального значения коэффициента избытка воздуха

Коэффициент избытка воздуха в топке  $\alpha_T$  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. 4.1) 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  $q_2 + q_3 + q_4$ .

Оптимальные значения коэффициента избытка воздуха в топке  $\alpha_T$  при сжигании:

мазута	1,05...1,1;
природного газа	1,05...1,1;
твердого топлива:	
камерное (факельное) сжигание	1,15...1,2;
слоевое сжигание	1,3 ... 1,4.

Расчетный коэффициент избытка воздуха  $\alpha$  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 объем продуктов сгорания увеличивается, возрастает избыток воздуха, и снижается температура газов.

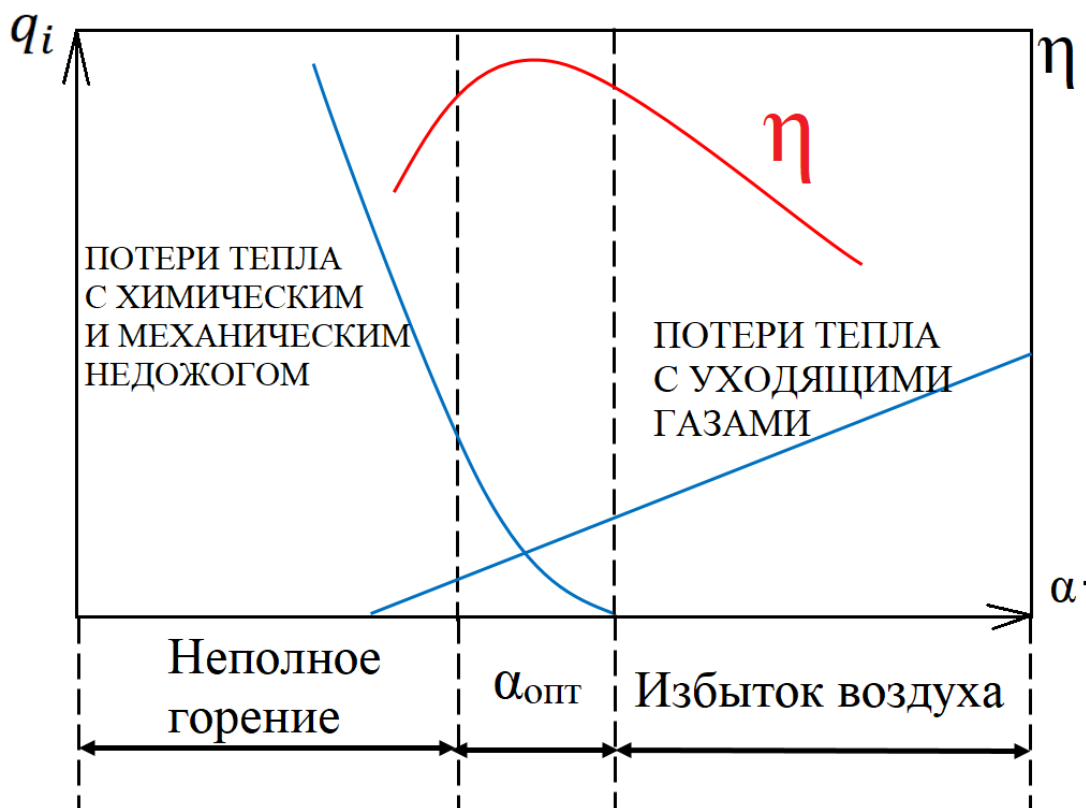


Рис. 4.1. К определению оптимального коэффициента избытка воздуха

**Присосы** (рис. 4.2) определяются в долях теоретически необходимого объема воздуха:

$$\Delta\alpha_i = \Delta V_i / V^0,$$

где  $\Delta V_i$  — объем 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.

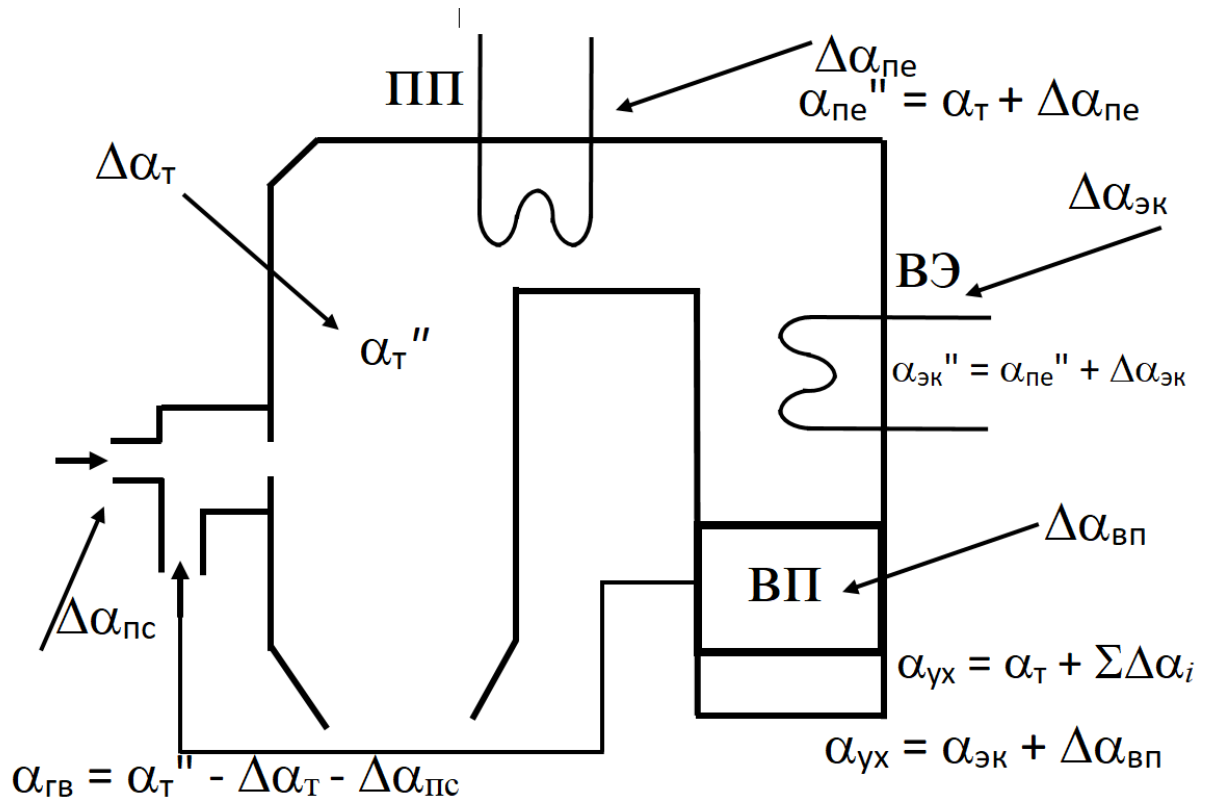


Рис. 4.2. Присосы воздуха по тракту котла

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

$$\alpha = \frac{V}{V^0} = \frac{V}{V - \Delta V}, \quad (4.1)$$

где  $\Delta V$  – избыточное количество воздуха.

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

$$V = \frac{100}{79} V_{N_2}. \quad (4.2)$$

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

$$\Delta V = \frac{100}{21} V_{O_2}. \quad (4.3)$$

Подставляя (4.2) и (4.3) в (4.1), 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 расчет ведется 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 упрощенных метода определения коэффициента избытка воздуха: **по концентрации кислорода** и **по концентрации сухих трехатомных газов** в продуктах сгорания.

Основным является метод прямого определения концентрации кислорода. Пересчет 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 объемы образовавшихся диоксидов углерода и серы равны объему 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**:

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

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  $4/32 = 1/8$  ( $2H_2 + O_2 = 2H_2O$ ,  $4 + 32 = 36$ ) 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 дает достаточно точные значения либо когда содержание водорода в топливе незначительно, либо когда

выполняется соотношение  $H^r/O^r \approx 1/8$  (например, при сжигании древесины).

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

$$RO_2 = CO_2 + SO_2,$$

где  $RO_2 = \frac{V_{RO_2}}{V_{c.r}} \cdot 100, \%$ .

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

$$RO_2^o = \frac{V_{RO_2}}{V_{c.r}} \cdot 100 = 21 \% .$$

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

$$RO_2^{\max} = \frac{V_{RO_2}}{V'_{c.r} + \Delta V_{N_2}} \cdot 100 = \frac{V_{RO_2}}{V_{c.r}^o} \cdot 100, \%$$

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  $\beta$** . 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  $\beta$  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  $\alpha > 1$  объем сухих газов составит

$$V_{c.г} = V_{c.г}^o + \Delta V,$$

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

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

Поскольку при этом объем  $V_{RO_2}$  не изменится, то:

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

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

- азотная формула:

$$\alpha = \frac{1}{1 - \frac{79}{21} \frac{O_2 - 0,5(CO + H_2) - 2CH_4}{N_2}}; \quad (4.4)$$

- кислородная формула:

$$\alpha = \frac{21}{21 - O_2}; \quad (4.5)$$

- по содержанию сухих трехатомных газов в продуктах сгорания:

$$\alpha = \frac{RO_2^{\max}}{RO_2}, \quad (4.6)$$

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

## 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 (камеру сгорания) 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 м<sup>3</sup> газообразного топлива.

Располагаемая теплота:

$$Q_p = Q_i^r + h_{\text{ТЛ}} + Q_{\text{ф}} + Q_{\text{В}}, \text{ кДж/кг (кДж/ м}^3\text{)},$$

где  $Q_i^r$  – низшая теплота сгорания рабочей массы топлива;  $h_{\text{ТЛ}}$  – физическая теплота топлива;  $Q_{\text{ф}}$  – теплота, вносимая в топку с паровым

дутьем или при паровом распылении мазута;  $Q_B$  – теплота, внесенная в топку воздухом.

Примечание: При составлении теплового баланса котельного агрегата теплота, вносимая воздухом, учитывается только при его подогреве вне котла (например, в паровом калорифере при сжигании мазута). Воздух, нагретый в котельном воздухоподогревателе, поступает на горение, и его теплота не учитывается в тепловом балансе котла, поскольку он получил эту теплоту от дымовых газов, образовавшихся в самом котле при сжигании топлива.

Для большей части достаточно сухих и малосернистых твердых топлив принимается  $Q_p = Q_i^r$ ; для газового топлива располагаемая теплота равняется низшей теплоте сгорания сухой массы топлива –  $Q_p = Q_i^d$ .

Для твердых топлив с высоким содержанием влаги и жидких топлив учитывается физическая теплота топлива  $h_{тл}$ , которая зависит от температуры и теплоемкости поступающего на горение топлива:

$$h_{тл} = c_{тл} t_{тл} ,$$

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

$t_{тл}$  – температура топлива, °C.

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

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

Теплоемкость сухой массы топлива  $c_{тл}^d$  составляет:

- для бурых углей — 1,13 кДж/(кг·°C);
- для каменных углей — 1,09 кДж/(кг·°C);
- для углей А, ПА, Т — 0,92 кДж/(кг·°C).

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

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

$$\text{Теплоемкость мазута } c_{тл} = 1,74 + 0,0025t_{тл}, \text{ кДж/(кг}\cdot\text{°С)}.$$

При распылении мазута с помощью паромеханических форсунок в топку котельного агрегата вместе с разогретым мазутом поступает пар, который вносит в топку дополнительную теплоту:

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

где  $G_{\phi}$  – удельный расход пара на 1 кг мазута, кг пара/кг мазута;

$h_{\phi}$  – энтальпия пара, поступающего в форсунку, кДж/кг.

Параметры пара, поступающего на распыл мазута:

$$P = 0,3 \div 0,6 \text{ МПа},$$

$$t = 280 \div 350 \text{ °С},$$

удельный расход пара  $G_{\phi} = 0,03 \div 0,05$  кг пара/кг мазута.

Теплота, вносимая в камеру сгорания с воздухом,  $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ ;  $\frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}$ :

$$Q_e = \alpha \cdot V_e^o \cdot C_e \cdot t_e,$$

где  $C_e$  – объёмная теплоёмкость воздуха,  $\frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{°С}}$ .

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

$$Q_{в.вн} = \beta_{в} (h_{в}^{o'} - h_{хв}^o),$$

где  $\beta_{в}$  – отношение количества предварительно подогретого воздуха к теоретически необходимому;  $h_{хв}^o$  – энтальпия теоретического объема холодного воздуха;  $h_{в}^{o'}$  – 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 м<sup>3</sup> газообразного топлива:

$$Q_p = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6, \quad (5.1)$$

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 (5.1) на  $Q_p$  и умножив на 100 %, получим уравнение 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, %;

$q_2, q_3, q_4, q_5, q_6$  – потери теплоты, %.

Коэффициент полезного действия котла:

$$\eta_{\text{ка}} = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6) = 100 - \sum_{i=2}^n q_i .$$

Примечание: Полезная теплота  $Q_1$  в камере сгорания переходит в теплоту (энтальпию) дымовых газов, а в котле – в теплоту рабочей среды (пара или воды). Поэтому при рассмотрении теплового баланса *процесса горения* сумма потерь в камере сгорания не включает потери с уходящими газами  $q_2$ , а КПД камеры сгорания:

$$\eta_{\text{кст}} = 100 - (q_3 + q_4 + q_5 + q_6) = 100 - \sum_{i=3}^n q_i .$$

Большая часть теплоты, вносимой в топку котлоагрегата, 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

$$Q_1 = D_B (h_B'' - h_B'), \text{ кВт},$$

где  $D_B$  – расход воды через котел, кг/с;  $h_B'$ ,  $h_B''$  – энтальпия воды на входе и на выходе из котла, кДж/кг;

- для парового котла

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

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

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

$$q_2 = \frac{h_{ух} - \alpha_{ух} h_{х.в}^0}{Q_p} (100 - q_4), \%,$$

где  $h_{ух}$  и  $h_{х.в}^0$  – соответственно, энтальпия уходящих газов

и теоретического количества холодного воздуха;

$\alpha_{ух}$  – коэффициент избытка воздуха в уходящих газах.

В продуктах сгорания топлива могут находиться газообразные горючие компоненты CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> (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 ( $\alpha_T$ );
- 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, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub> – объемные концентрации продуктов неполного сгорания топлива в сухих продуктах сгорания, %; V<sub>сг</sub> – объем сухих продуктов сгорания, м<sup>3</sup>/кг.

Потери теплоты с химическим недожогом зависят от коэффициента избытка воздуха и нагрузки топочного устройства.

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 выше  $\alpha_{\text{кр}}$  химический недожог, как правило, не возникает. Обычно  $\alpha_{\text{кр}} = 1,02 \div 1,03$ , что и характеризует степень аэродинамического несовершенства горелочного устройства.

**Механический недожог** при сжигании твердых 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  $\alpha > \alpha_{\text{опт}}$  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:

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

где  $a_{\text{шл}}$  и  $a_{\text{ун}}$  – соответственно, доли золы в шлаке и в уносе;

$\Gamma_{\text{шл}}$  и  $\Gamma_{\text{ун}}$  – содержание горючих в шлаке и уносе, %;

32,7 – теплота сгорания коксовых частиц в шлаке и уносе, МДж/кг;

$A^r$  – зольность рабочей массы топлива, %.

Значение **потерь теплоты в окружающую среду** от наружного охлаждения  $q_5$  составляет от 0,2 до 2,5 %, зависит от толщины обмуровки и теплопроводности материала изоляции и принимается, как правило, по нормативам в зависимости от мощности котла (расхода пара) при условии, что температура поверхности внешнего слоя изоляции не превышает 45 °.

**Потери теплоты с физической теплотой шлака** определяются по формуле:

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

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

При снижении тепловой нагрузки котла происходит некоторое падение температуры уходящих газов, что приводит к уменьшению потерь теплоты с уходящими газами. 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.

**Расход топлива В**, 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:

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

### 5.1. Энтальпия продуктов сгорания

Температура газов на выходе из камеры сгорания определяется из уравнения теплового баланса камеры сгорания, схема которой представлена на рис. 5.1.

$$Q_p \cdot \frac{100 - \sum q_i^{кцз}}{100} = I_2 ,$$

$\sum q_i^{кцз} = q_3 + q_4 + q_5 + q_6$  – сумма потерь теплоты в камере сгорания, %;

$I_2 = I_2^o + (\alpha - 1) \cdot I_6^o$  – энтальпия продуктов сгорания,  $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \left( \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3} \right)$ .

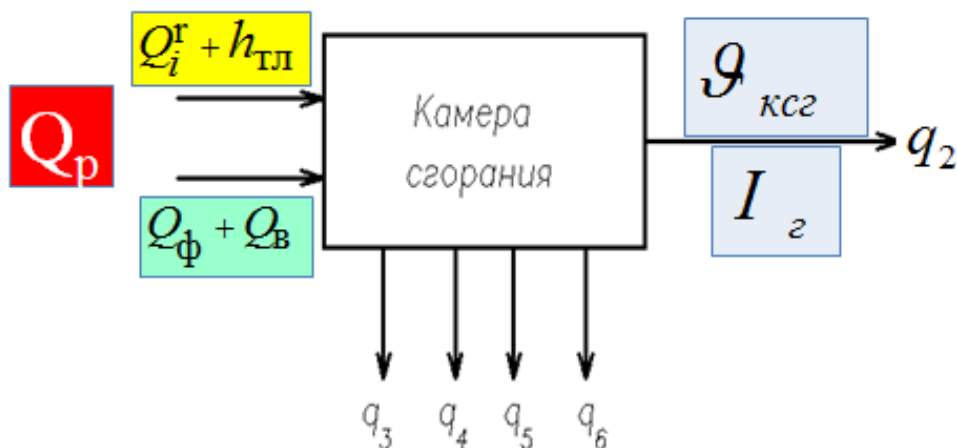


Рис. 5.1. Иллюстрация теплового баланса камеры сгорания

Энтальпии теоретических объёмов воздуха и продуктов сгорания при коэффициенте избытка воздуха  $\alpha=1$  для всех видов топлива (кДж/кг, кДж/м<sup>3</sup>) определяются как:

$$I_6^o = V_B^o (c\mathcal{G})_B ;$$

$$I_2^o = V_{RO_2} (c\mathcal{G})_{RO_2} + V_{H_2O}^o (c\mathcal{G})_{H_2O} + V_{N_2}^o (c\mathcal{G})_{N_2} .$$

В приведенных формулах:  $(c\mathcal{G})_B$  ,  $(c\mathcal{G})_{RO_2}$  ,  $(c\mathcal{G})_{H_2O}$  ,  $(c\mathcal{G})_{N_2}$  – энтальпии 1 м<sup>3</sup>, соответственно, воздуха, трёхатомных газов, водяных паров и азота.

Таким образом, энтальпия продуктов сгорания при избытке воздуха  $\alpha > 1$  в камере сгорания:

$$I_2 = I_2^o + (\alpha - 1) \cdot I_6^o = V_{RO_2} (c\mathcal{G})_{RO_2} + V_{H_2O}^o (c\mathcal{G})_{H_2O} + V_{N_2}^o (c\mathcal{G})_{N_2} + (\alpha - 1) V_B^o (c\mathcal{G})_B .$$

При условии, что воздух состоит из 79 % азота и 21 % кислорода, а также имеет определённое влагосодержание, энтальпия продуктов сгорания:

$$\begin{aligned} I_2 &= V_{RO_2} (c\mathcal{G})_{RO_2} + V_{H_2O} (c\mathcal{G})_{H_2O} + V_{N_2} (c\mathcal{G})_{N_2} + V_{O_2} (c\mathcal{G})_{O_2} = \\ &= (V_{RO_2} c_{RO_2} + V_{H_2O} c_{H_2O} + V_{N_2} c_{N_2} + V_{O_2} c_{O_2}) \cdot \mathcal{G}_{кцз} = \mathcal{G}_{кцз} \cdot \sum V_2 c_2 , \end{aligned}$$

где  $V_{N_2} = V_{N_2}^o + 0,79 \cdot (\alpha - 1) V_6^o$ ,

$$V_{O_2} = 0,21 \cdot (\alpha - 1) V_6^o ,$$

$$V_{H_2O} = V_{H_2O}^o + 0,0161 \cdot (\alpha - 1) V_6^o .$$

Средние теплоёмкости воздуха и продуктов сгорания, в зависимости от температуры, приводятся в соответствующих таблицах, при этом  $c_{RO_2}$  принимается равной  $c_{CO_2}$ .

Таким образом, уравнение теплового баланса преобразуется следующим образом:

$$Q_p \cdot \frac{100 - \sum q_i^{кцз}}{100} = \mathcal{G}_{кцз} \cdot \sum V_2 c_2 .$$

## 5.2. Температура в камере сгорания

Решение уравнения теплового баланса относительно температуры в камере сгорания  $\vartheta_{\text{КСГ}}$  в явном виде не имеет решения, поскольку входящие в это уравнение теплоёмкости продуктов сгорания сами являются функцией температуры  $\vartheta_{\text{КСГ}}$ .

Определить  $\vartheta_{\text{КСГ}}$  можно, используя метод *последовательных приближений*, или *графоаналитический* метод (рис. 5.2).

Из уравнения теплового баланса температура на выходе из камеры сгорания:

$$\vartheta_{\text{КСГ}} = Q_p \cdot \frac{100 - \sum q_i^{\text{КСГ}}}{100} \cdot \frac{1}{\sum V_{\text{г}} c_{\text{г}}}, \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Запишем эту зависимость в виде двух функций:

$$\begin{cases} y_1 = \vartheta_{\text{КСГ}} \\ y_2 = Q_p \cdot \frac{100 - \sum q_i^{\text{КСГ}}}{100} \cdot \frac{1}{\sum V_{\text{г}} c_{\text{г}}} \end{cases}$$

Решение задачи относительно  $\vartheta_{\text{КСГ}}$  сводится к нахождению условий, при которых  $y_1 = y_2$ . Значения  $y_1$  и  $y_2$  рассчитываются не менее чем по трём значениям  $\vartheta_{\text{КСГ}}$ , близким к ожидаемому. Пересечение прямой  $y_1$  и расчётной кривой  $y_2$  даёт искомую температуру на выходе из камеры сгорания  $\vartheta_{\text{КСГ}}$  (см. рис. 5.2).

Рассмотрим пример, проиллюстрированный на рис. 5.2.

Исходные (расчётные) данные:

- располагаемое тепло топлива  $Q_p$ ,
- суммарные потери в камере сгорания  $\sum q_i^{\text{КСГ}}$ ,
- объёмы трёхатомных газов  $V_{\text{RO}_2}$ , водяных паров  $V_{\text{H}_2\text{O}}$ , азота  $V_{\text{N}_2}$  и кислорода  $V_{\text{O}_2}$ .

Принимаем температуру  $\vartheta_{\text{КСГ}} = y_1 = 1700 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

Из табл. 5.1 находим теплоёмкости газов при данной температуре и определяем  $y_2 = 1773 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

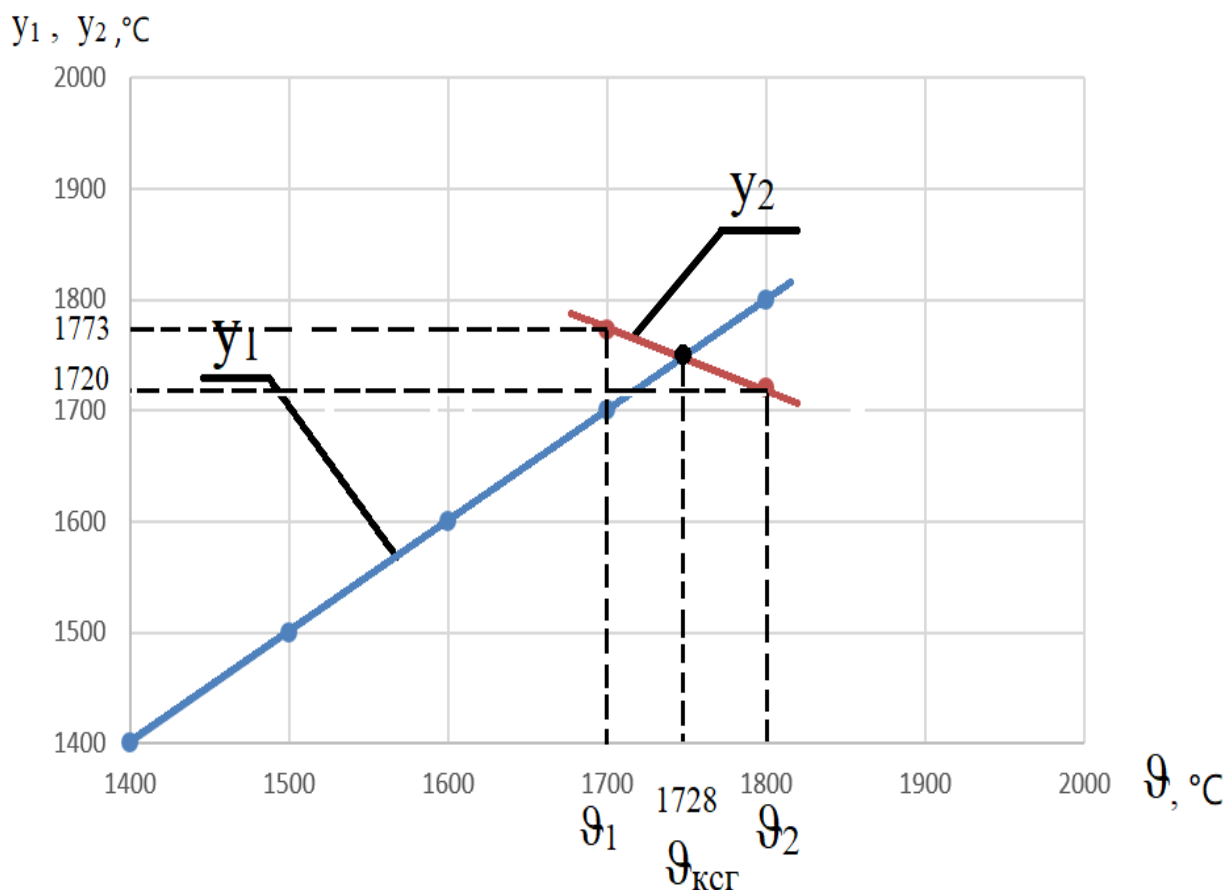


Рис. 5.2. Графоаналитический метод определения температуры в камере сгорания

Принимаем ближайшее табличное значение температуры, превышающее  $1773\text{ }^{\circ}\text{C} \rightarrow \vartheta_{\text{КСГ}} = y_1 = 1800\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Из табл. 5.1 находим теплоёмкости газов при данной температуре и определяем  $y_2 = 1720\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

На пересечении прямых находится примерное значение температуры в камере сгорания  $1728\text{ }^{\circ}\text{C}$  (см. рис. 5.2).

Для уточнения определяются теплоёмкости газов при температуре  $1728\text{ }^{\circ}\text{C}$  (путём линейной интерполяции, см. табл. 5.1) и рассчитывается уточнённое значение температуры.

Таблица 5.1

Теплоёмкость дымовых газов, кДж/(м<sup>3</sup>·°С)

	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
1700	2,3761	1,4623	1,5474	1,9010
1728	2,3809	1,4644	1,5496	1,9071
1800	2,3933	1,4698	1,5553	1,9228

$$\begin{cases}
 y_1 = 1700 \\
 y_2 = Q_p \cdot \frac{100 - \sum q_i^{кка}}{100} \cdot \frac{1}{\sum V_i c_i} = \\
 = 19830 \cdot \frac{100 - 1,2}{100} \cdot \frac{1}{2,3761 \cdot 0,95 + 1,901 \cdot 1,207 + 1,4623 \cdot 4,51 + 1,5474 \cdot 0,11} = 1773
 \end{cases}$$

$$\begin{cases}
 y_1 = 1800 \\
 y_2 = Q_p \cdot \frac{100 - \sum q_i^{кка}}{100} \cdot \frac{1}{\sum V_i c_i} = \\
 = 19830 \cdot \frac{100 - 1,2}{100} \cdot \frac{1}{2,3933 \cdot 0,95 + 1,9228 \cdot 1,207 + 1,4698 \cdot 4,51 + 1,5553 \cdot 0,11} = 1720
 \end{cases}$$

$$\begin{cases}
 y_1 = 1728 \\
 y_2 = Q_p \cdot \frac{100 - \sum q_i^{кка}}{100} \cdot \frac{1}{\sum V_i c_i} = \\
 = 19830 \cdot \frac{100 - 1,2}{100} \cdot \frac{1}{2,3809 \cdot 0,95 + 1,9071 \cdot 1,207 + 1,4644 \cdot 4,51 + 1,5496 \cdot 0,11} = 1728
 \end{cases}$$



## 6. Динамика процесса горения

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

*Интенсивность (скорость) 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, или диффузионного массообмена).

Условия горения – одновременное протекание и химических, и физических процессов, лежащих в основе процесса горения:

- скорость химических реакций должна быть достаточно велика,
- тепломассообменные процессы обязательны – если в зону горения не будут поступать новые порции окислителя (воздух, кислород), произойдёт затухание факела.

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*.

Сжигание различных видов топлива имеет свою специфику. Например, суммарный (обобщающий) процесс горения твёрдого топлива (как наиболее сложный) может быть представлен в виде следующих параллельно и последовательно протекающих стадий (рис. 6.1, 6.2):

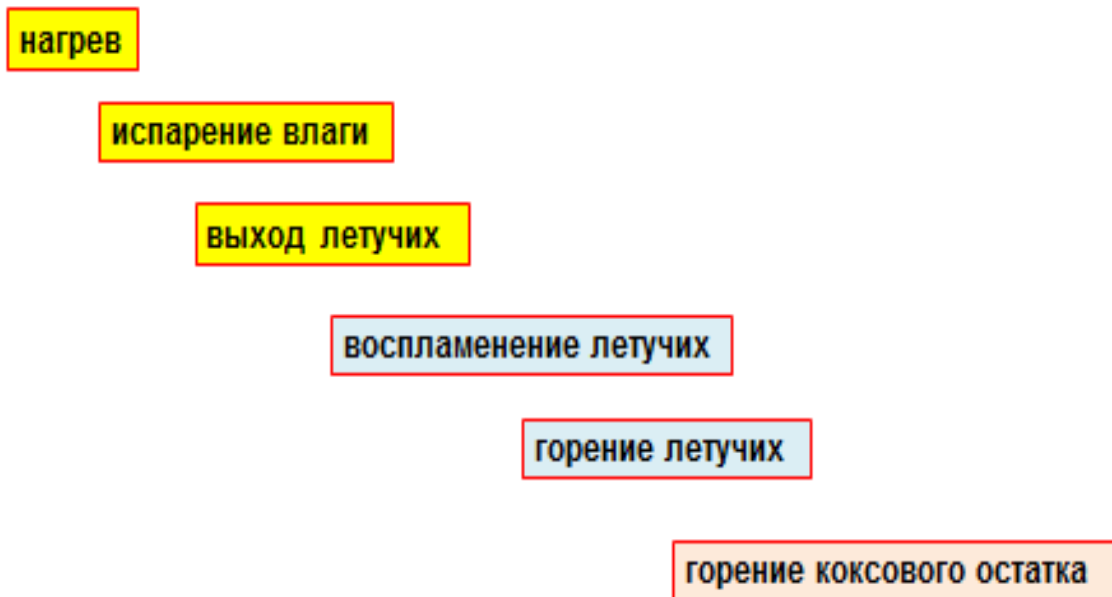


Рис. 6.1. Стадии горения твёрдого топлива

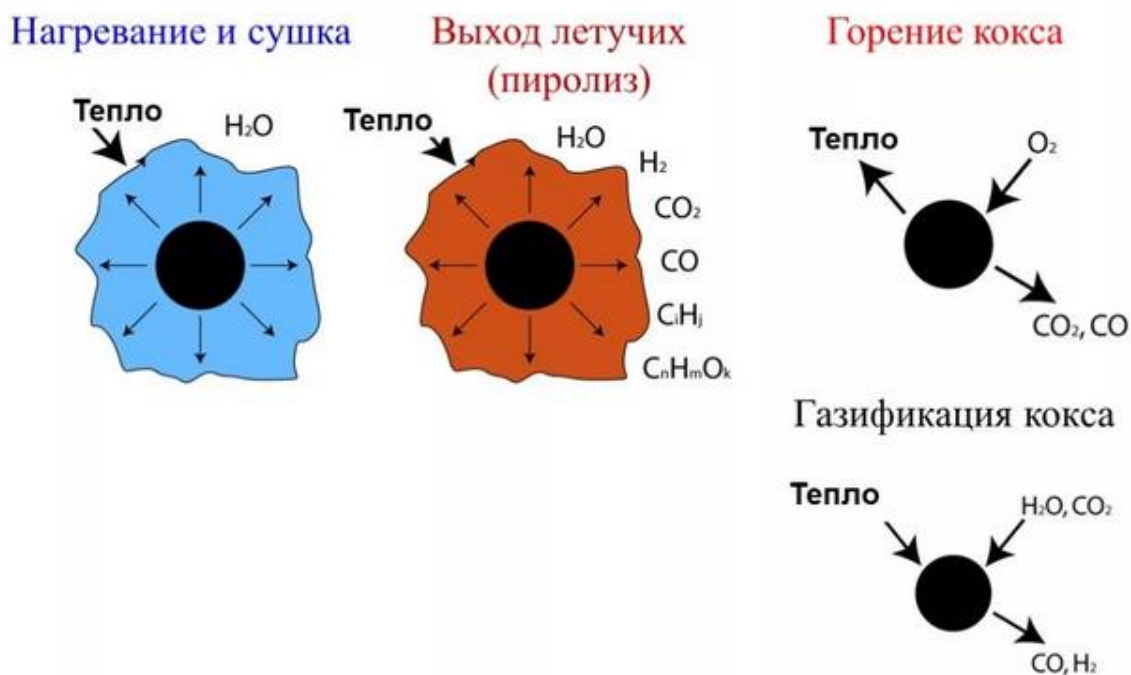


Рис. 6.2. Схематическое представление стадий горения твёрдого топлива

При этом сложность расчёта усугубляется тем, что одна частица находится, например, на стадии выхода летучих, а другая – уже в конце процесса горения кокса.

Общее время горения твёрдого топлива, таким образом, включает в себя время термической подготовки топлива и время самого горения:

$$\tau_{\text{общ}} = \tau_{\text{т.п.т}} + \tau_{\text{гор}},$$

где  $\tau_{\text{т.п.т}} = \tau_{\text{нагр}} + \tau_{\text{исп}} + \tau_{\text{вых.лет}},$

$$\tau_{\text{гор}} = \tau_{\text{гор}}^{\text{лет}} + \tau_{\text{гор}}^{\text{кокс}}.$$

При этом именно процесс горения кокса определяет суммарное время горения:

$$\tau_{\text{гор}}^{\text{кокс}} = 0,8 \cdot \tau_{\text{общ}}.$$

Ниже рассматриваются основы химических и физических факторов, определяющих интенсивность процессов горения – *кинетика* и *диффузия*.

## 6.1. 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**.

В процессе горения протекают:

- гомогенные реакции;
- гетерогенные реакции;
- топохимические реакции.

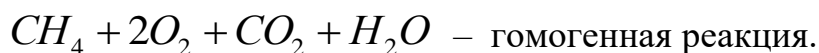
**Гомогенная смесь** должна удовлетворять двум условиям:

1 – компоненты находятся в *одинаковом фазовом состоянии*;

2 – между компонентами *отсутствует поверхность раздела фаз*.

Пример гомогенной смеси: природный газ + воздух. Соответственно, примерами гомогенного горения являются сжигание газообразного топлива, горение парогазовой смеси, образующейся в процессе испарения

капли жидкого топлива (мазута), и горение летучих веществ, выделяющихся в процессе термического разложения твёрдого топлива.



Смесь компонентов является *гетерогенной* в двух случаях:

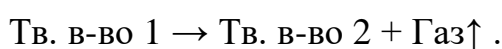
1 – если компоненты находятся в *разных фазовых состояниях* (уголь + воздух);

2 – если компоненты находятся в *одинаковом фазовом состоянии*, но между ними *присутствует поверхность раздела фаз* (например, сахарный песок + соль).

Пример гетерогенного горения: горение коксового остатка.



**Топохимическая реакция** протекает в объёме твёрдого вещества: внутри твёрдого вещества происходит распад, в результате чего образуется новое твёрдое вещество и газ:



Пример топохимической реакции: термическое разложение топлива с образованием кокса и выделением летучих веществ:



### 6.1.1. Скорость реакции горения и её зависимость от концентрации реагирующих веществ

В химической кинетике скорость **гомогенной реакции** определяется количеством вещества, прореагировавшего в единице объема 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  $V = \text{const}$ :

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

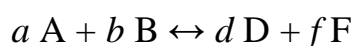
Здесь знак «минус» указывает на уменьшение концентрации вещества в процессе реакции.

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

Скорость реакции горения можно охарактеризовать 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 сдвинуто 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 идет». 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.

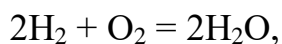
Согласно *закону действующих масс*, в закрытой гомогенной системе при постоянной температуре скорость химической реакции



в каждый момент времени пропорциональна произведению концентраций реагирующих веществ:

$$W = k C_A^a C_B^b .$$

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:

$$W_1 = k_1 C_{H_2}^2 C_{O_2};$$

$$W_2 = k_2 C_{H_2O}^2,$$

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  $W_{рез} = W_1 - W_2$ . В случае, когда  $W_1 \gg W_2$ , можно пренебречь скоростью обратной реакции и принять  $W_{рез} = W_1$ . 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 CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, SO<sub>2</sub> в этих условиях ничтожна.

При более высоких температурах полнота сгорания топлива снижается, поскольку необходимо учитывать степень диссоциации  $\alpha_{дис}$  (табл. 6.1).

Таблица 6.1

Степень диссоциации продуктов сгорания

Реакция	Температура, К		
	1800	2500	2750
$H_2 + O_2 \rightarrow H_2O$	0,2 %	4 %	13 %
$CO + O_2 \rightarrow CO_2$	0,8 %	6 %	20 %

При реальных температурах в двигателях, топках котлов, камерах сгорания газовых турбин степень диссоциации ниже 1 % и может не учитываться.

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 ее 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 путем устанавливаются опытные коэффициенты  $\alpha$  и  $\beta$ , отражающие суммарный механизм протекания сложной многостадийной реакции:

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

Коэффициенты  $\alpha$  и  $\beta$  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 ее 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 ее 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 твердого 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 остается 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 *твердого топлива* химические реакции происходят на поверхности топлива в результате столкновений частиц газообразного окислителя (атомов, молекул, радикалов) с молекулами горючего. Количество этих столкновений, отнесенное 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 твердого топлива остается 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 твердого 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.

### 6.1.2. 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 объеме, 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 произойдет с энергией, достаточной для разрушения старых внутримолекулярных связей (рис. 6.3).

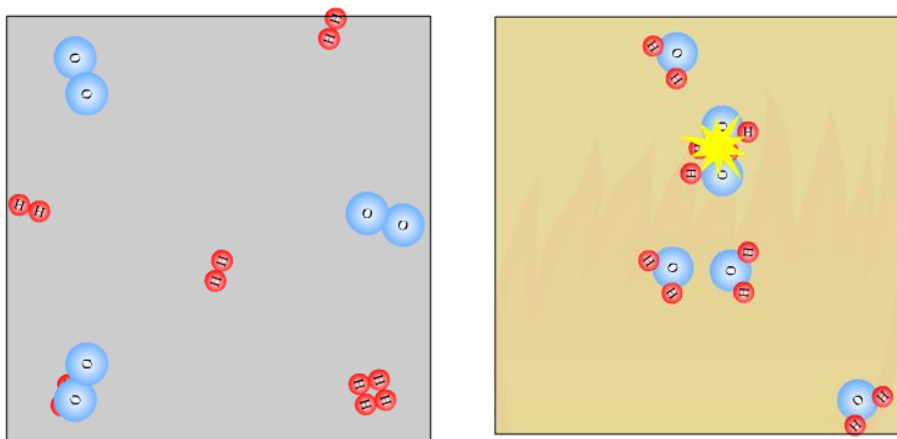


Рис. 6.3. Иллюстрация химической реакции

*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 произойдет реакция.

На рис. 6.4 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.

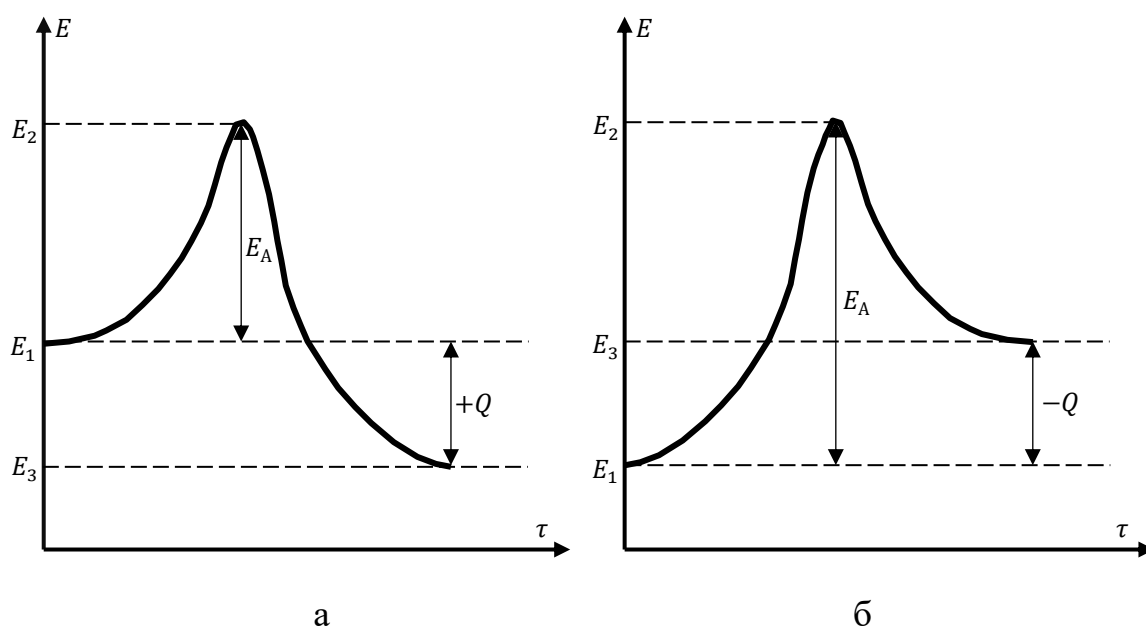


Рис. 6.4. Энергия активации и тепловой эффект реакции:  
а – экзотермическая реакция; б – эндотермическая реакция

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

$$E_2 = E_1 + E_A.$$

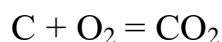
В состоянии (2) молекулы при столкновении вступают в химическую реакцию с образованием продуктов реакции и выделением теплоты. После охлаждения продуктов реакции до начальной температуры (состояние (3)) внутренняя энергия продуктов сгорания (если речь идет о реакции горения) будет равна  $E_3$ , а количество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

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. 6.4а), т. е.  $Q > 0$ , то реакция **экзотермическая**, если — отрицательная (рис. 6.4б), т. е.  $Q < 0$ , то реакция **эндотермическая**.

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

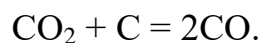
Чем выше энергия активации, тем труднее осуществить реакцию. Например, для реакции окисления углерода кислородом воздуха



энергия активации, по данным различных исследователей, составляет:

$$E_A = 75 \dots 125 \text{ МДж/кмоль.}$$

При высоких температурах возможна реакция восстановления двуокси углерода у раскаленной поверхности углерода



Энергия активации для этой реакции

$$E_A = 100 \dots 200 \text{ МДж/кмоль.}$$

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**.

### **6.1.3. 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. 6.5):

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

где  $N_0$  – полное количество молекул в единице объема;  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $R = 8,314$  кДж/(кмоль·К).

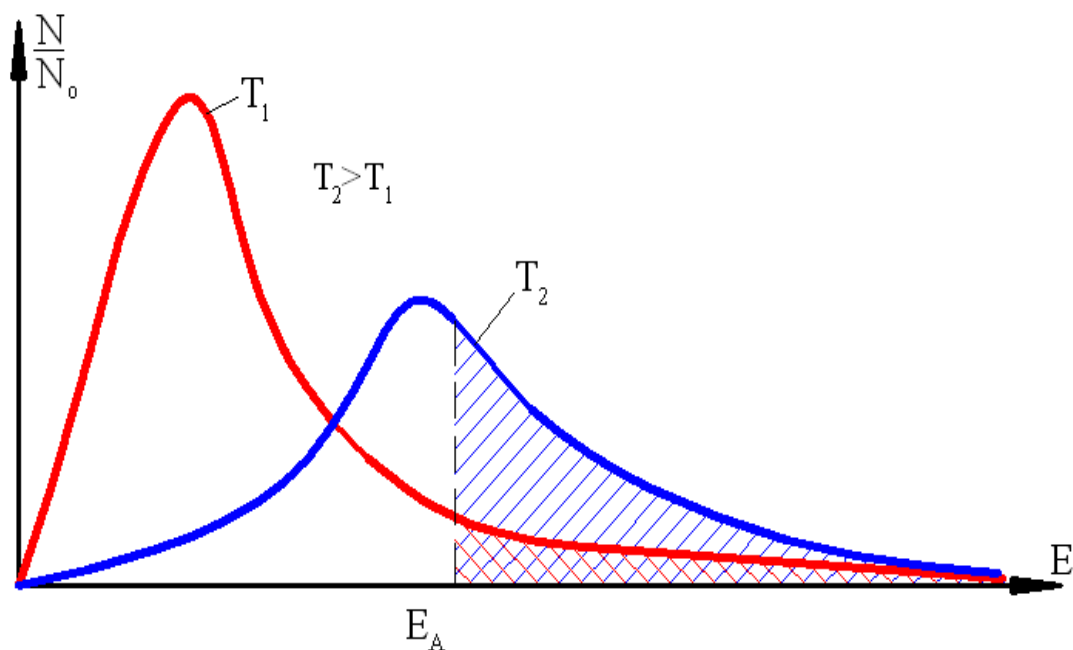


Рис. 6.5. Статистический закон Максвелла–Больцмана

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 растет и скорость химической реакции.

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 ученым *Сванте Аррениусом* и представляет собой частный случай общего закона Максвелла-Больцмана применительно к химическим реакциям (рис. 6.6).

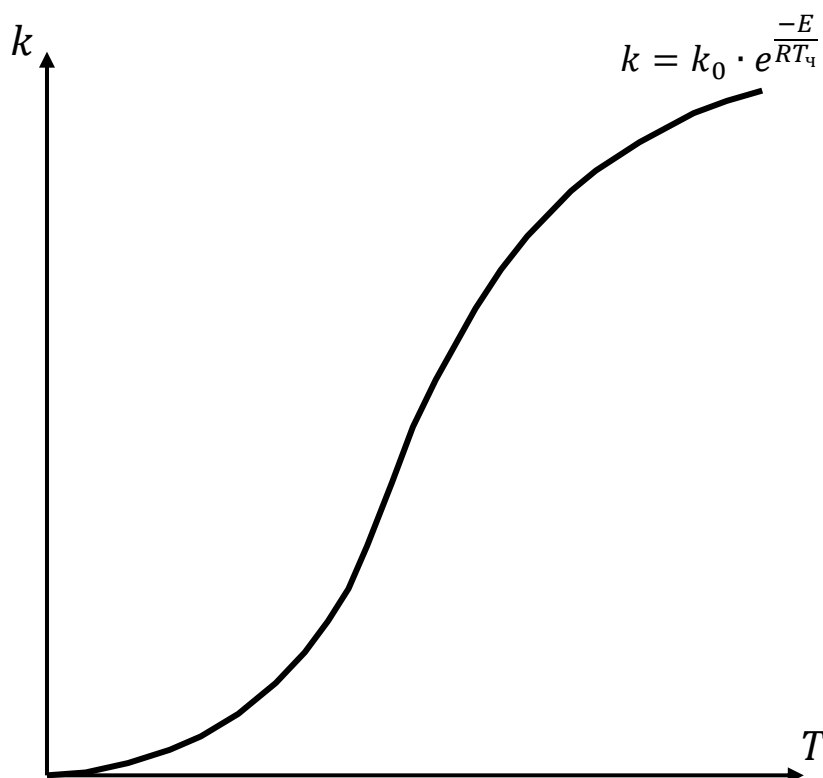


Рис. 6.6. Закон Аррениуса

Аррениус выдвинул гипотезу, что реакция протекает только при выполнении условия

$$\frac{m \cdot U^2}{2} \geq E_A,$$

где  $m = \frac{m_A \cdot m_B}{m_A + m_B}$  — приведённая масса молекул реагирующих веществ;

$U$  — скорость соударения молекул.

То есть, если при соударении молекул выделяется  $E \geq E_A$ , реакция идёт, а если  $E \leq E_A$ , реакция не идёт.

*Закон (постулат) Аррениуса*, полученный эмпирическим путем, устанавливает зависимость константы скорости химической реакции  $k$  от температуры  $T$ :

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

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

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 двуокси углерода при энергии активации  $E = 125\,000$  кДж/кмоль и



температурах 1000 К и 1500 К. При этом концентрации кислорода у поверхности горения и в объеме 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 еще 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 счет роста температуры увеличиваются и скорости движения молекул, а, следовательно, и значение предэкспоненциального множителя  $k_0$ , но незначительно:

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

Очевидно, что изменение  $k_0$  несоизмеримо с влиянием температуры на рост количества реакционноспособных молекул и их соударений.

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

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

На примере видно, что 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 ее 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  $E = 125\,000$  кДж/кмоль

$$T_{\text{пер}} = 125\,000 / (2 \cdot 8,314) = 7517 \text{ К}.$$

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.

## 6.2. Диффузия и массообмен при горении углерода

Как уже было отмечено, скорость процесса горения определяется не только кинетикой протекания химических реакций окисления горючих компонентов топлива, но и скоростью процессов диффузионного массообмена, т.е. интенсивностью подвода окислителя в зону горения и отвода продуктов сгорания за счёт молекулярной и турбулентной диффузии.

Рассмотрим, например, процесс горения частицы твёрдого топлива (или капли жидкого топлива).

С поверхности частицы (капли) навстречу потоку воздуха (окислителя) направляются летучие (горючие) пары, встречаются с молекулами воздуха, образуя горючую смесь.

В результате горения углерода кокса, кислород расходуется на поверхности частицы. Для поддержания устойчивого горения необходимо непрерывно подводить кислород из окружающего объема к поверхности частицы, а продукты сгорания, соответственно, непрерывно отводятся от поверхности частицы в топочный объём. Таким образом, химический процесс горения сопровождается процессом взаимной встречной диффузии кислорода и продуктов сгорания ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ) у поверхности частицы.

Образование горючих смесей и отвода продуктов сгорания определяются законами массообмена.

*Диффузией* называется процесс распространения молекул одного вещества между молекулами другого, приводящий к самопроизвольному выравниванию их концентраций по всему занятому объему (за счёт свободного молекулярного движения).

*Пример: перемешивание газов (распространение запахов) или жидкостей (если в воду капнуть чернил, то жидкость через некоторое время станет равномерно окрашенной).*

Если одно вещество уже имеет выравненную концентрацию, то говорят о диффузии одного вещества в другом. При этом перенос вещества происходит из области с более высокой концентрацией в область с низкой концентрацией (рис. 6.7).

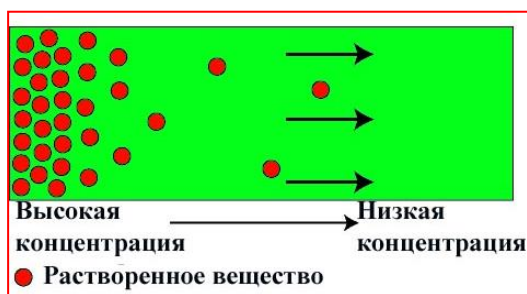


Рис. 6.7. Процесс диффузии

Различают следующие виды диффузии:

- *самодиффузия* – молекулы вещества перемещаются в самом веществе на расстояние, превышающее размер молекул (рис. 6.8)

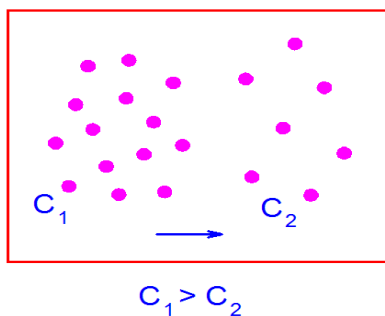


Рис. 6.8. Самодиффузия

В газах самодиффузия протекает достаточно быстро (в течение минут), в жидкостях – медленно (в течение часов), в твёрдых веществах – значительно медленнее (в течение лет);

- *встречная диффузия* – например, в процессе горения молекулы кислорода движутся навстречу парам горючих веществ и диффундируют друг в друга:

- а) *бинарная, или бимолекулярная, диффузия*;

- б) *полимолекулярная диффузия* – вещество диффундирует в объём, где содержится смесь других веществ;

- *термодиффузия* – перенос компонентов газовых смесей (или растворов) под влиянием *градиента температуры*, т.е. из-за перепада температур молекулы разных веществ будут по-разному разгоняться и двигаться (рис. 6.9).

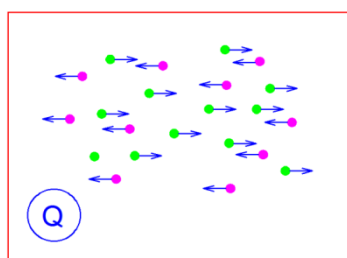


Рис. 6.9. Термодиффузия

Если разность температур поддерживается постоянной, то в объёме смеси возникает градиент концентрации, что вызывает также и обычную (концентрационную) диффузию.

Важнейшей характеристикой процесса массообмена является *коэффициент диффузии*, характеризующий интенсивность *диффузионного потока*  $g$ , который представляет собой количество вещества, проходящего через единичную поверхность в единицу времени, моль/( $m^2 \cdot c$ ).

Развитие процессов тепло- и массообмена между частицей топлива и окружающей средой определяется пограничным слоем, поскольку он является сопротивлением на пути потоку.

**Пограничный слой** (ПС) – это объём окружающей среды, присоединённый к поверхности частицы (тела) и двигающийся вместе с частицей (телом) (рис. 6.10). По отношению к окружающей среде он неподвижен, поэтому процессы переноса через него осуществляются только *молекулярными механизмами*, а *молярный поток* отсутствует.

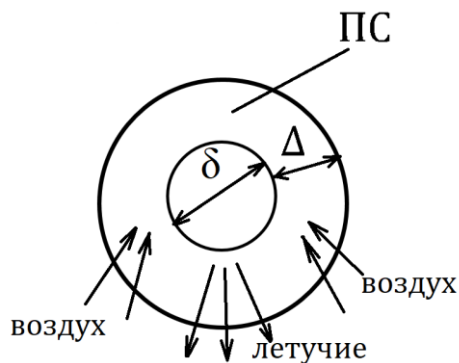


Рис. 6.10. Пограничный слой

*Интенсивность диффузионного обмена*, а, следовательно, и величина *коэффициента диффузии*  $D$  зависит от характера и интенсивности молекулярного движения (скорости молекул), которая в свою очередь определяется температурой.

Характеристики молекулярного движения – это скорость движения молекул  $W_m$  и длина свободного пробега молекул  $l_{n.m}$ . Распределение молекул по скорости описывается законом Планка  $W_m = f(t)$ . Чем выше давление  $P$ , тем больше молекул находится в единице объёма. Чем выше температура, тем больше длина свободного пробега молекул  $l_{n.m} = f(t)$ .

С ростом температуры коэффициент диффузии увеличивается, с ростом давления – уменьшается.

Как уже было отмечено, в процессе горения возникает встречная диффузия молекул кислорода, паров горючего и продуктов сгорания.

Предположим, имеется смесь двух различных газов при общем постоянном давлении  $P$ , но при наличии градиента парциального давления  $p_1$  и  $p_2$  (концентраций  $C_1, C_2$ ). Тогда тепловое движение молекул из-за

различия концентраций компонентов приводит к возникновению потоков массы, согласно закону Фика:

$$g_1 = -D_{12} \frac{dC_1}{dx} = -g_2 = D_{21} \frac{dC_2}{dx}, \text{ моль}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}),$$

где  $D_{12} = D_{21}$  – коэффициенты взаимной (встречной) диффузии по концентрации, м<sup>2</sup>/с;  $C_1, C_2$  – концентрации компонентов, моль/м<sup>3</sup>.

Если считать компоненты смеси идеальными газами, то

$$C_i = \frac{P_i}{RT} \text{ и можно записать } -\frac{D_{12}}{RT} \frac{dp_1}{dx} = \frac{D_{21}}{RT} \frac{dp_2}{dx},$$

где  $p_1, p_2$  – парциальные давления компонентов, Па;  $R$  – универсальная газовая постоянная, кДж/(моль·К).

Коэффициенты встречной диффузии, как уже было отмечено, зависят от температуры и давления

$$D_{12} = D_{o12} \cdot \left( \frac{T}{T_o} \right)^n \cdot \frac{P_o}{P},$$

где  $D_o, T_o, P_o$  – значения коэффициента диффузии, температуры и давления при нормальных условиях ( $t_o = 0$  °С,  $T_o = 273$  К,  $P_o = 760$  мм рт. ст.);  $D, T, P$  – фактические параметры в рассматриваемых условиях;  $n = 1,75 \dots 2,5$ ; для оценочных расчётов принимается  $n = 2$ .

Коэффициенты взаимной встречной диффузии компонентов дымовых газов при нормальных условиях определены экспериментально (табл. 6.2).

Расчёт коэффициентов взаимной диффузии компонентов при расчётной температуре  $T_p$  осуществляется по полуэмпирической формуле Сазерленда в модификации Н.Д. Косова, см<sup>2</sup>/с:

$$D_{12} = D_{o12} \cdot \frac{P_o}{P} \cdot \left[ \frac{C_1 + T_o}{C_1 + T} \cdot \frac{C_2 + T_o}{C_2 + T} \right]^{0,5} \cdot \left( \frac{T}{T_o} \right)^{2,5},$$

где  $C_1, C_2$  – коэффициенты Сазерленда (табл. 6.3), зависящие от вида веществ, участвующих в диффузии, [К], (чем выше молекулярный вес, тем выше  $C_i$ ).

Таблица 6.2

Коэффициенты встречной диффузии

Компоненты	$D_{012}$ [см <sup>2</sup> /с]
H <sub>2</sub> ↔ O <sub>2</sub>	0,67...0,7
O <sub>2</sub> ↔ N <sub>2</sub>	0,181...0,187
O <sub>2</sub> ↔ CO	0,185
H <sub>2</sub> ↔ воздух	0,59...0,63
O <sub>2</sub> ↔ воздух	0,178
CO <sub>2</sub> ↔ воздух	0,138
H <sub>2</sub> O ↔ воздух	0,22

Если в объёме находится смесь не двух, а многих разных веществ, то возникает полимолекулярная диффузия. При этом средний коэффициент молекулярной диффузии в газовой смеси

$$D_{in} = \frac{1 - x_1}{\frac{x_2}{D_{12}} + \frac{x_3}{D_{13}} + \dots + \frac{x_n}{D_{1n}}}$$

где  $x_1, x_2, \dots, x_n$  – парциальные давления доли данного вещества в газовой смеси;

$$x_i = \frac{p_i}{P},$$

где  $P$  – общее давление,  $p_i$  – парциальное давление данного вещества;

$$\sum_{i=1}^n p_i = P, \quad \sum_{i=1}^n x_i = 1.$$

Коэффициенты Сазерленда, К

Вещество	$C_i$ [К]
N <sub>2</sub>	107
O <sub>2</sub>	138
CO	102
CO <sub>2</sub>	255
воздух	115

В бинарной смеси (при постоянном давлении в отсутствие внешних сил) **полный диффузионный поток** вещества представляет собой сумму потока *молекулярной* (концентрационная диффузия) и *термодиффузии*.

Поток *молекулярной диффузии* (с учётом поправки на массу молекул) [кг/(м<sup>2</sup>·с)]:

$$g_{12} = -\frac{M_1 \cdot M_2}{M_{см}} \cdot D_{12} \cdot \text{grad} C_1 = -\frac{M_1 \cdot M_2}{M_{см}} \cdot \frac{D_{12}}{RT} \cdot p \cdot \text{grad} \frac{p_1}{p},$$

где  $p_1$  – парциальное давление,  $C_1 = \frac{p_1}{RT}$ ;  $M_1$ ,  $M_2$ ,  $M_{см}$  – молекулярные массы компонентов и смеси.

За счёт *термодиффузии* появляется «довесок»:

$$g_{12} = -\frac{M_1 \cdot M_2}{M_{см}} \cdot C \cdot \frac{D_T}{T} \cdot \text{grad} T,$$

где  $D_T$  – коэффициент термодиффузии, или

$$g_{12} = -\frac{M_1 \cdot M_2}{M_{см}} \cdot \frac{D_{12}}{RT} \cdot p \cdot \frac{k_T}{T} \text{grad} T,$$

где  $k_T = \frac{D_T}{D_{12}}$  – *термодиффузионное отношение* – характеризует отношение потока за счёт термодиффузии к потоку за счёт



концентрационной диффузии, т.е. показывает, какую долю составляет поток термодиффузии от общего потока концентрационной диффузии,

причём 
$$gradC_1 = -\frac{k_T}{T} gradT .$$

Таким образом, полный диффузионный поток:

$$g_{12} = -\frac{M_1 \cdot M_2}{M_{см}} \cdot \frac{D_{12}}{RT} \cdot p \cdot \left( grad \frac{p_1}{p} + \frac{k_T}{T} \cdot gradT \right).$$

Величина  $k_T$  зависит от температурного интервала  $\Delta T$  (табл. 6.4):

Таблица 6.4

Смесь	$M_1/M_2$	Температурный интервал, $\Delta T$ , К	$k_T$
$CO_2 \leftrightarrow N_2$	1,57	288 – 400	0,01
$O_2 \leftrightarrow N_2$	1,14	293	0,004
$N_2 \leftrightarrow H_2$	13,9	288 – 456	0,078
$O_2 \leftrightarrow H_2$	15,9	до 294	0,048
$CO_2 \leftrightarrow H_2$	21,8	288 – 456	0,071

В процессах горения  $\frac{gradT}{T} \approx 1$ , поэтому  $k_T$  составляет тысячные доли (термодиффузия составляет тысячные доли от концентрационной диффузии), т.е. термодиффузия вторична и может не учитываться при расчётах процесса горения.

В газовых смесях может быть ещё *бародиффузия*, если общее давление в смеси перемененно из-за действия каких-либо сил (например, центробежных). В этом случае в уравнении появится дополнительный член:

$$g_{12} = -\frac{M_1 \cdot M_2}{M_{см}} \cdot \frac{D_{12}}{RT} \cdot p \cdot \left( grad \frac{p_1}{p} + \frac{k_T}{T} \cdot gradT + \frac{k_B}{p} \cdot gradp \right),$$

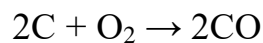
где  $k_B = \frac{D_B}{D_{12}}$  – бародиффузионное отношение;  $D_B$  – коэффициент бародиффузии.

### 6.2.1. Молярный перенос. Стефановский поток

Соотношение для диффузионных потоков усложняется, если в системе протекают физические или химические процессы, связанные с изменением объёма газовой смеси.

При протекании гетерогенных реакций (горение кокса, испарение с поверхности жидкости, конденсация на поверхности и т.д.) появляется дополнительный **молярный** перенос массы. Таким образом, осуществляется перенос не только отдельных молекул (молекулярный перенос), а целого объёма вещества (молярный перенос) – так называемый *стефановский поток* (впервые введён Стефаном при рассмотрении диффузионного испарения жидкости в газовую среду).

Реакция гетерогенного неполного горения углерода



протекает с увеличением объёма (слева 1 моль  $O_2 = 22,4 \text{ м}^3$ , а справа 2 моля  $CO = 44,8 \text{ м}^3$ ).

Полный диффузионный поток массы любого компонента с учётом возникающего стефановского потока запишется в виде:

$$g_i = g_{iD} + \frac{w_C p_i}{RT},$$

где  $g_{iD}$  – собственно диффузионный поток, связанный с градиентом парциального давления (концентрации);  $w_C$  – скорость вынужденного молярного переноса (стефановского потока);  $p_i/(RT)$  – молярная концентрация рассматриваемого компонента.

### 6.2.2. Аналогия между тепло- и массообменом

Между процессами переноса тепла и вещества существует аналогия.

Переноса теплоты может осуществляться:

- теплопроводностью (перенос теплоты за счёт молекулярного движения) – закон Фурье;

- конвекцией (перенос теплоты за счёт вынужденного движения потока) – закон Ньютона-Рихмана;

- излучением (перенос теплоты электромагнитными волнами) – закон Стефана-Больцмана.

Согласно закону Фурье  $q = -\lambda \cdot \text{grad}t = -\lambda \frac{dT}{dx}$ , количество теплоты, которое переносится за счёт молекулярного движения, пропорционально коэффициенту теплопроводности  $\lambda$  и градиенту температур  $\text{grad}t$ .

По аналогии с переносом теплоты, перенос вещества определяется законом Фика:

$$g = -D \cdot \text{grad}C = -D \frac{dC}{dx},$$

т.е. количество вещества, которое переносится за счёт диффузии, пропорционально коэффициенту диффузии  $D$  и градиенту концентрации  $\text{grad}C$ .

Законы Фурье и Фика отражают перенос, соответственно, тепла и вещества за счёт движения молекул.

Знак « $\leftarrow$ » в обоих уравнениях оказывает на то, что перенос теплоты и вещества осуществляется в сторону уменьшения, соответственно, температуры и концентрации.

Из сопоставления соотношений, описывающих законы Ньютона-Рихмана и Фурье, можно получить критерий Нуссельта:

$$Nu_T = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda}.$$

Для диффузионного массообмена потока у поверхности вводится соотношение, аналогичное закону Ньютона:

$$g = \alpha_D \cdot \Delta C \quad \text{или} \quad g = \frac{\alpha_D}{RT} \cdot \Delta p,$$

где  $\alpha_D$  – коэффициент диффузионного обмена (массоотдачи), [м/с], аналогичный коэффициенту теплоотдачи  $\alpha$ ;  $\Delta C$  – разность концентраций диффундирующего компонента в потоке и у поверхности;  $\Delta p$  – соответствующая разность парциальных давлений;  $T$  – определяющая температура пограничного слоя, [К].

Коэффициент массообмена можно вычислить из критериальных уравнений, которые описывают теплообмен и массообмен. Если заменить критерий Прандтля ( $Pr_T$ ) на диффузионный критерий Прандтля ( $Pr_D$ ) и критерий Нуссельта ( $Nu_T$ ) на диффузионный критерий Нуссельта ( $Nu_D$ ), то формула выглядит следующим образом:

$$Nu_D = \frac{\alpha_D \cdot d}{D}.$$

Критериальные уравнения представляют зависимость от двух определяющих критериев:

$$Nu_T = f(Re, Pr);$$

$$Nu_D = f(Re, Pr_D),$$

где критерий Прандтля:

$$Pr_T = \frac{\nu}{a}; \quad Pr_D = \frac{\nu}{D}.$$

Для шаровой частицы (капли) в потоке для расчёта тепло- и массообмена критериальное уравнение представлено в виде:

$$Nu = 2 + A \cdot Re^n \cdot Pr^m,$$

а) для малых частиц  $Nu \rightarrow 2$ ;

б) для крупных частиц  $Nu = A \cdot Re^n \cdot Pr^m$ .

Формула *Кацнельсона-Тимофеевой* для расчёта тепломассообмена сферических частиц с окружающей средой в стационарных условиях

$$Nu = 2 + 0,03 \cdot Re^{0,54} \cdot Pr^{0,33} + 0,35 \cdot Re^{0,8} Pr^{0,36}$$

справедлива при значениях  $Re^{0,54} \cdot Pr^{0,33}$  от 0 до 800.

В области малых значений **Re** для газовой среды более удобна формула *Сокольского-Тимофеевой*

$$Nu = 2 + 0,16 \cdot Re^{2/3} .$$

При **Re > 200** для сферических частиц в газовой среде можно использовать формулу *Вырубова*

$$Nu = 0,54 \cdot \sqrt{Re} .$$

Следует отметить, что аналогия между тепло- и массообменными процессами является не полной, так как присутствует дополнительный молярный перенос массы, который, как уже было отмечено, называется *стефановским потоком*.

### **6.2.3. Относительное движение частиц в потоке. Скорость витания**

Для оценки интенсивности массообмена при расчёте выгорания углеродной частицы необходимо определить *относительную скорость движения частицы* в потоке дымовых газов, которая характеризует величину критерия Рейнольдса.

Относительная установившаяся скорость между частицей и потоком влияет на интенсивность всех тепломассообменных процессов: чем выше скорость, тем выше интенсивность процессов тепло- и массообмена между частицей и потоком.

Если пренебречь изменением температуры (*изотермический процесс*), относительная скорость частицы зависит от теплофизических свойств газовой среды, формы и размера частицы.

При попадании частицы в поток меняются её траектория и скорость. Для достаточно малых по массе частиц время нестационарного движения незначительно, скорость частицы быстро достигает постоянного значения, между частицей и потоком возникает постоянная скорость, равная скорости витания  $W_{вит}$ .

Условия наступления такого движения – равновесие сил; далее частица движется в потоке с постоянной скоростью, отставая от потока на величину скорости витания.

В условиях *стационарного* процесса при отсутствии сил инерции и давления в газовом потоке на частицу действуют три силы: сила тяжести  $\vec{F}_T$ , выталкивающая сила Архимеда  $\vec{F}_A$  и сила аэродинамического сопротивления потока  $\vec{F}_c$  (рис. 6.11).

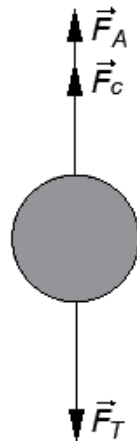


Рис. 6.11. Силы, действующие на частицу в газовом потоке

Сила тяжести  $\vec{F}_T$  направлена вертикально вниз и по модулю равна:

$$\vec{F}_T = m_q \cdot \vec{g} = \frac{\rho_q \cdot \pi \cdot \delta^3}{6} \cdot \vec{g},$$

где  $\frac{\pi \cdot \delta^3}{6}$  – объем частицы, м<sup>3</sup> (при условии, что частица имеет форму шара);  $\rho_q$  – плотность частицы, кг/м<sup>3</sup>;  $\delta$  – размер частицы, м.

Выталкивающая сила Архимеда  $\vec{F}_A$  направлена вертикально вверх и по модулю равна весу газа, вытесненного частицей:

$$\vec{F}_A = m_g \cdot \vec{g} = \frac{\rho_g \cdot \pi \cdot \delta^3}{6} \cdot \vec{g},$$

где  $\frac{\rho_g \cdot \pi \cdot \delta^3}{6}$  – масса газа, вытесненного частицей, кг.

Сила аэродинамического сопротивления потока газа  $\vec{F}_c$ :

$$\vec{F}_c = c \cdot f \cdot \rho_2 \cdot \frac{(w_2 - w_4)^2}{2},$$

где  $w_2, w_4$  – скорости потока газов и частицы, м/с;  $c$  – коэффициент аэродинамического сопротивления частицы;  $f$  – наибольшая площадь поперечного сечения частицы (миделево сечение), м<sup>2</sup>.

Относительная скорость, при которой частица находится в состоянии динамического равновесия, когда векторная сумма сил, действующих на частицу, равна нулю, называется *скоростью витания*.

До тех пор, пока равновесия сил нет, наблюдается ускоренное движение:

$W > W_{\text{вит}}$  → режим пневмотранспорта;

$W < W_{\text{вит}}$  → частица (тело) падает с установившейся скоростью, т.е. поток не может транспортировать частицу.

Например, скорость падения без парашюта:  $W \approx 300$  м/с;  
с парашютом:  $W \approx 15$  м/с.

В состоянии динамического равновесия:

$$\vec{F}_T = \vec{F}_c + \vec{F}_A$$

или

$$m_4 \cdot \vec{g} = c \cdot f \cdot \rho_2 \cdot \frac{(w_2 - w_4)^2}{2} + m_2 \cdot \vec{g}.$$

Отсюда скорость витания:

$$w_{\text{вит}} = w_2 - w_4 = \sqrt{\frac{4 \cdot g \cdot \delta \cdot (\rho_4 - \rho_2)}{3 \cdot c \cdot \rho_2}}. \quad (6.1)$$

Коэффициент аэродинамического сопротивления для шаровой частицы в начальном диапазоне определяется в зависимости от критерия Рейнольдса (рис. 6.12), при этом можно выделить четыре области, обуславливающие обтекание частицы потоком:

1 – область Стокса –  $c = \frac{24}{\text{Re}}$  (линейная зависимость);

2 – переходная –  $c = \frac{24}{Re} + \frac{4}{\sqrt{Re}}$ ;

две автомодельные области, где  $c$  не зависит от  $Re$ :

3 –  $c = 0,48$ ;

4 –  $c = 0,2$ .

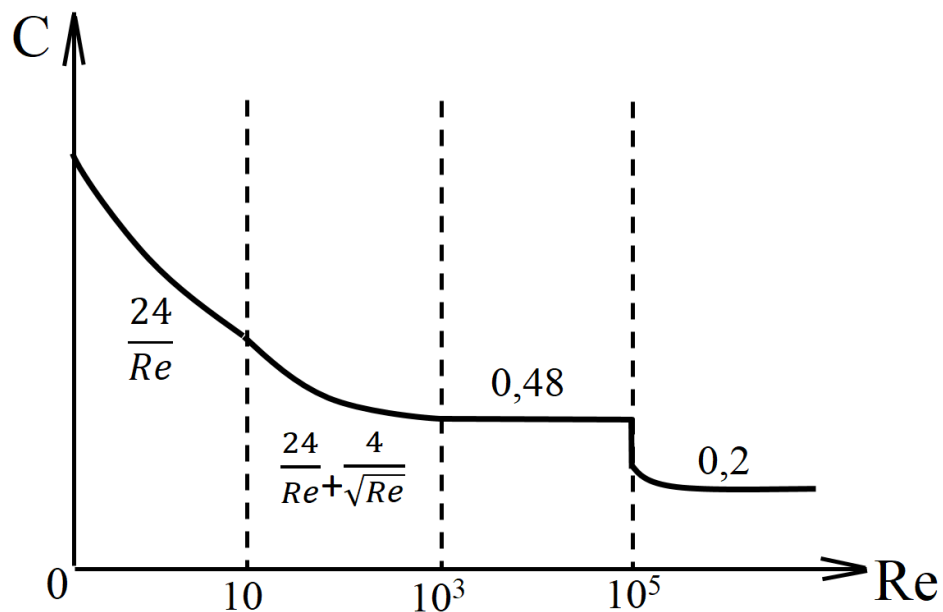


Рис. 6.12. Зависимость коэффициента аэродинамического сопротивления от критерия Рейнольдса

Функциональная зависимость отражает характер взаимодействия потока с частицей (телом), т.е. то, как происходит обтекание:

- Стоксовское течение – безотрывное обтекание тела потоком (рис. 6.13),
- из-за аэродинамического сопротивления возникают вихри, в результате при обтекании тела происходит потеря энергии (рис. 6.14).

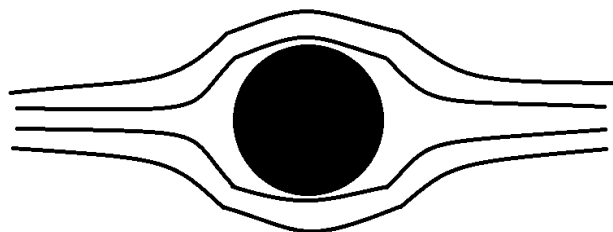


Рис. 6.13. Стоксовское течение



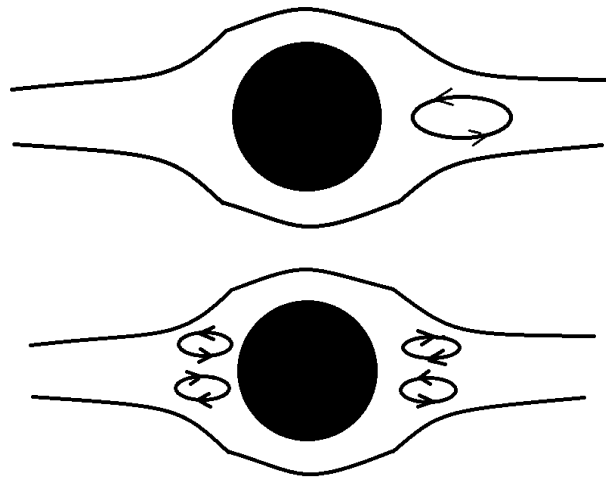


Рис. 6.14. Образование вихревых зон при обтекании частицы  
ПОТОКОМ

Однако по формуле (6.1) скорость витания можно определить только *методом последовательного приближения*, так как коэффициент сопротивления, в свою очередь, является функцией критерия Рейнольдса.

Алгоритм расчёта сводится к следующему: следует предварительно задаться скоростью витания  $W_{вum1}$ , определить критерий  $Re_1$  и значение коэффициента сопротивления  $c_1$ , по формуле (6.1) рассчитать скорость витания  $W_{вum2}$  и далее до тех пор, пока не совпадут  $W_{вum.i} = W_{вum.i+1}$ .

Другой (более точный) способ определения скорости витания частицы основан на теории подобия и критериальной зависимости двух безразмерных комплексов, которые вытекают из постановки задачи: критерия Шиллера (искомый, или определяемый)  $Sch$  и критерия Кирпичёва (определяющий)  $Ki$ :

$$Sch = \frac{Ki^2}{24 \left( 1 + \frac{Ki^{1.5}}{36} \right)}, \quad (6.2)$$

где  $Ki = \sqrt[3]{c Re^2}$  – критерий Кирпичёва; (6.3)

$$Re = \frac{w_{вum} \cdot \delta}{\nu_2}; \quad (6.4)$$

$$Sch = \frac{Re}{Ki} \text{ – критерий Шиллера.} \quad (6.5)$$

Подставив (6.1) в (6.4), а (6.4) в (6.3), получим

$$\begin{aligned} Ki &= \sqrt[3]{c Re^2} = \sqrt[3]{c \frac{w_{вум}^2 \cdot \delta^2}{v_2^2}} = \sqrt[3]{c \cdot \frac{4g(\rho - \rho_2) \cdot \delta}{3\rho_2 \cdot c} \cdot \frac{\delta^2}{v_2^2}} = \\ &= \delta \cdot \sqrt[3]{\frac{4g}{3v_2^2} \cdot \frac{\rho - \rho_2}{\rho_2}}. \end{aligned} \quad (6.6)$$

Тогда после подстановки (6.6) в (6.5) имеем

$$Sch = \frac{Re}{Ki} = \frac{w_{вум} \cdot \delta}{v_2} \cdot \frac{\sqrt[3]{\frac{3v_2^2}{4g} \cdot \frac{\rho_2}{\rho - \rho_2}}}{\delta} = w_{вум} \cdot \sqrt[3]{\frac{3}{4g v_2} \cdot \frac{\rho_2}{\rho - \rho_2}}. \quad (6.7)$$

Таким образом, алгоритм определения скорости витания углеродной частицы диаметром  $\delta$  в газовой среде с известными параметрами можно представить в следующем виде:

1.  $Ki = f(\delta, \rho, \rho_2, v_2)$  – по формуле (6.6)  $\rightarrow$
2.  $Sch = f(Ki)$  – по формуле (6.2)  $\rightarrow$
3.  $w_{вум} = f(Sch)$  – из формулы (6.7).

Применительно к телам любой геометрической формы с размерами  $[a, b, c]$  следует определить эквивалентный диаметр тела (частицы), для чего необходимо найти объём шара  $V_{шара}$ , аэродинамически эквивалентного объёму данного тела  $V_{тела}$ :

$$V_{шара} = V_{тела} \rightarrow \frac{\pi \delta^3}{6} = a \cdot b \cdot c \rightarrow \text{эквивалентный диаметр } \delta_{экр} = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot a \cdot b \cdot c}{\pi}}.$$

$$\text{Аэродинамически эквивалентный диаметр } \delta_{э.а} = \frac{1,125}{\frac{1}{a} + \frac{1}{b} + \frac{1}{c}}.$$

Тогда скорость витания такой частицы

$$W_{вит} = \frac{W_{шар}}{\sqrt{K_{\phi}}},$$

где  $K_{\phi}$  – коэффициент, зависящий от формы тела (частицы).

*Коэффициент формы тела  $K_{\phi}$*  показывает, насколько аэродинамическое сопротивление тела зависит от его формы:

- шар  $K_{\phi} = 1$ ,
- эллипсоид  $K_{\phi} \neq 1$ ;  $K_{\phi} \approx 2 \dots 3$ ,
- параллелепипед  $K_{\phi} = 5$ ,
- тонкие тела ( $a \ll b$  или  $a \ll c$ )  $K_{\phi} = 10 \dots 50$ ,
- парусные тела (например, лист бумаги)  $\rightarrow$  большое аэродинамическое сопротивление.

Скорость витания определяет интенсивность тепломассообменных процессов:

- *теплообмен* характеризуется коэффициентом теплоотдачи  $\alpha \leftarrow$  определяется критерием  $Nu \leftarrow Nu = f(Re) \leftarrow Re = f(W_{вит})$ ;

- *массообмен* характеризуется коэффициентом массообмена  $\alpha_m \leftarrow$  определяется диффузионным критерием  $Nu_D \leftarrow Nu_D = f(Re) \leftarrow Re = f(W_{вит})$ .

### **6.3. 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 *физических* факторов, влияющих на скорость процессов образования горючей смеси, подвода окислителя в

зону активного горения (к поверхности углеродной частицы), отвода продуктов сгорания из зоны горения и пр.

Как уже отмечалось, *скорость химической реакции* определяется законами химической *кинетики* – учения о механизмах протекания химического процесса во времени, а *скорость процесса образования горючей смеси* – в свою очередь, интенсивностью протекания молекулярной и турбулентной *диффузии* (рис. 6.15).



Рис. 6.15. Факторы, определяющие скорость горения

Анализ процесса горения начинается с оценки влияния на него *кинетики* и *диффузии*, так как в реальных условиях интенсивность процесса зависит от скорости протекания химической реакции и скорости диффузии кислорода в зону горения.

Очевидно, что скорость горения обратно пропорциональна суммарному сопротивлению кинетических и диффузионных факторов

$$W_{гор} \sim \frac{1}{R_{гор}},$$

где  $R_{гор}$  – сопротивление процессу горения

$$R_{гор} = R_{диф} + R_{кин},$$

где  $R_{диф}$  – диффузионное сопротивление;

$R_{кин}$  – кинетическое сопротивление,

$$W_{гор} \sim \frac{1}{R_{диф} + R_{кин}}.$$

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

Как упростить задачу? В каких случаях можно пренебречь одним из факторов? Как выделить один из факторов, который будет тормозить процесс? Когда скорость процесса горения определяется только скоростью химической реакции или, наоборот, скоростью диффузии?

В зависимости от условий протекания процесса влияние  $R_{диф}$  и  $R_{кин}$  на процесс горения может быть различно:

$$R_{диф} \gg R_{кин} \quad (R_{кин} \rightarrow 0) \rightarrow W_{гор} \sim \frac{1}{R_{диф}} \quad - \text{диффузионная область};$$

$$R_{кин} \gg R_{диф} \quad (R_{диф} \rightarrow 0) \rightarrow W_{гор} \sim \frac{1}{R_{кин}} \quad - \text{кинетическая область};$$

$$R_{кин} \approx R_{диф} \rightarrow W_{гор} \sim \frac{1}{R_{диф} + R_{кин}} \quad - \text{промежуточная (диффузионно-кинетическая) область горения.}$$

Чтобы определить, в какой области протекает процесс горения, необходимо знать  $R_{диф}$  и  $R_{кин}$ , а для этого надо найти (знать) закономерности развития процесса горения.

Скорость химической реакции гетерогенного горения представляет собой количество кислорода, потребляемого единицей реакционной поверхности за единицу времени:

$$W_{O_2}^{кин} = kC_{II} = \frac{kP_{II}}{RT_{ч}}, \quad \frac{\text{кмоль}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}, \quad (6.8)$$

где  $k$  – константа скорости химической реакции,  $\frac{\text{м}}{\text{с}}$ ;

$C_{II}$  – молярная концентрация кислорода у поверхности частицы,  $\frac{\text{кмоль}}{\text{м}^3}$ ;

$P_{II}$  – парциальное давление кислорода у поверхности частицы, Па;

$T_{ч}$  – температура частицы, К;

$R = 8,314 \text{ кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К})$  – универсальная газовая постоянная.

Согласно закону Фика, скорость диффузионного переноса кислорода из объёма к поверхности частицы (рис. 6.16):

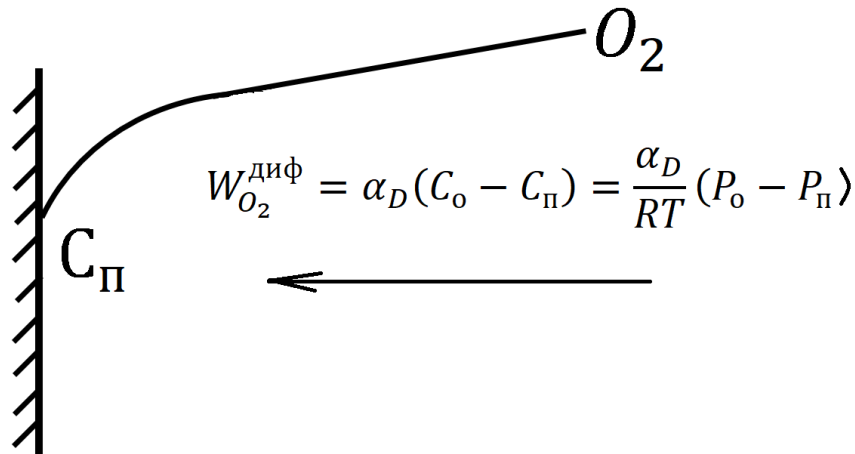


Рис. 6.16. Диффузия кислорода у поверхности частицы

$$W_{O_2}^{\text{диф}} = \alpha_D (C_0 - C_{\text{П}}) = \frac{\alpha_D}{RT} (P_0 - P_{\text{П}}), \frac{\text{кмоль}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}, \quad (6.9)$$

где  $\alpha_D$  – коэффициент массоотдачи,  $\frac{\text{м}}{\text{с}}$ ;

$C_0$  – молярная концентрация кислорода в объёме,  $\frac{\text{кмоль}}{\text{м}^3}$ ;

$P_0$  – парциальное давление кислорода в объёме, Па.

Если решить два уравнения относительно концентрации кислорода у поверхности частицы, то после подстановки  $C_{\text{П}}$  из уравнения (6.8) в уравнение (6.9) получается выражение для скорости гетерогенного горения через количество кислорода, потребляемого единицей реакционной поверхности частицы за единицу времени:

$$W_{O_2} = C_0 \frac{\alpha_D \cdot k}{\alpha_D + k} = C_0 \frac{1}{\frac{1}{k} + \frac{1}{\alpha_D}} = k_{\text{эф}} C_0, \frac{\text{кмоль}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}, \quad (6.10)$$

где  $k_{\text{эф}} = \frac{1}{\frac{1}{k} + \frac{1}{\alpha_D}}$  – эффективная константа скорости гетерогенного горения,  $\frac{\text{м}}{\text{с}}$ .

Скорость протекания химических реакций между молекулами горючего и окислителя  $W_{\text{хим}}$  с увеличением температуры прогрессивно

возрастает, согласно закону Аррениуса (рис. 6.17). Зависимость диффузионного массообмена от температуры менее значительна.

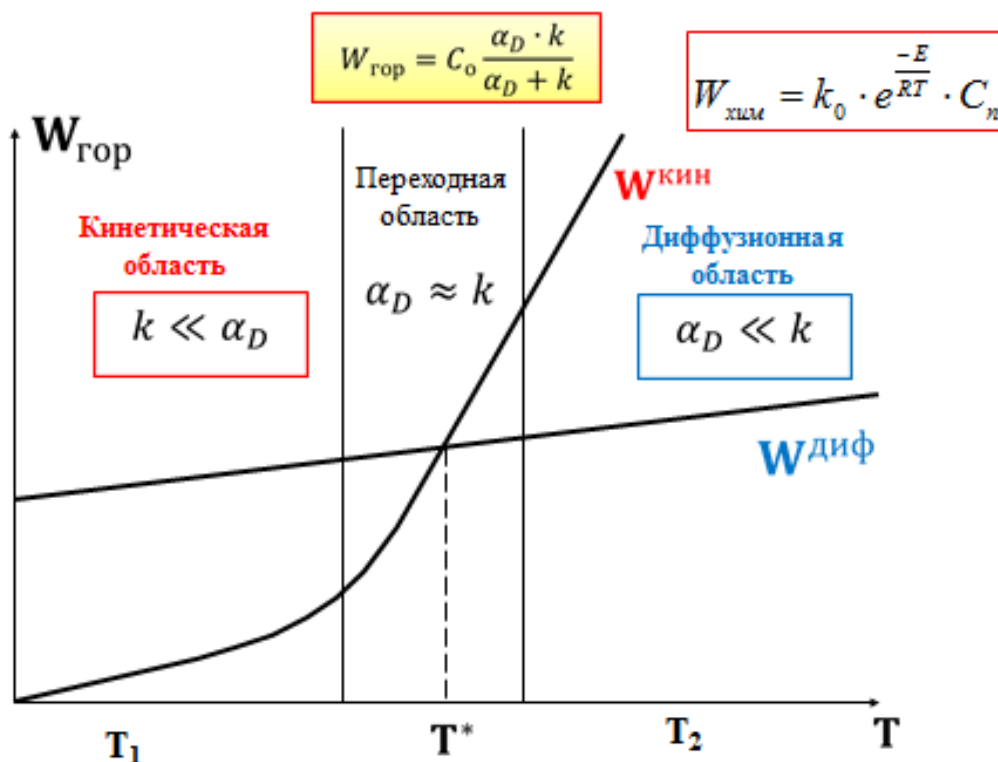


Рис. 6.17. Диффузионно-кинетическое горение

В области низких температур (на графике –  $T_1$ ) скорость химической реакции значительно ниже скорости диффузии, и, следовательно, результирующая скорость горения определяется скоростью химической реакции, т. е. горение протекает в **кинетической области** и с достаточной точностью может быть описано уравнением (6.8). Кинетическое горение обычно наблюдается при сравнительно низких температурах. При высоких температурах кинетическое горение может протекать только при условии очень интенсивного смесеобразования.

В области высоких температур скорость химической реакции значительно выше скорости подвода окислителя к горючему, результирующая скорость горения практически не зависит от скорости реакции, определяющим (лимитирующим) фактором является процесс диффузии кислорода к горючему (на графике –  $T_2$ ). Такое горение называется **диффузионным** и описывается уравнением (6.9).

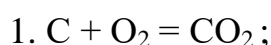
Кроме кинетического и диффузионного горения, существуют такие условия, когда скорость химической реакции и скорость диффузии – величины одного порядка (температура  $T^*$ ). Такое горение, определяемое как кинетическими, так и диффузионными процессами, называется промежуточным (переходная область). В этом случае пренебречь ни одним из определяющих факторов нельзя, и процесс описывается уравнением (6.10).

Рассмотрим в качестве примера горение твердого топлива. Обычно в начальный период реакции, когда температура процесса еще невысока, скорость химической реакции мала, а в окружающем частицу объеме и у поверхности ее 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 горячей частице *не повлияют* на процесс горения. Следовательно, это область *кинетического* горения.

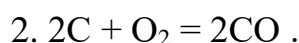
При высоких температурах в зоне горения химическая реакция протекает интенсивно и поглощает большое количество кислорода. Концентрация кислорода у поверхности частицы начинает интенсивно падать, и в дальнейшем скорость горения уже определяется *скоростью диффузии* кислорода в зону горения, которая практически не зависит от скорости химической реакции, 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.

Область горения твердого топлива определяется по значению суммы диффузионно-кинетических критериев  $N_i$  по первичным реакциям горения углерода







Критерий  $N_i$  представляет собой отношение диффузионного сопротивления к кинетическому или другими словами, константы скорости химической реакции  $k_i$  к коэффициенту массоотдачи  $\alpha_D$  :

$$N_i = \frac{R_{\text{диф}}}{R_{\text{кин}}} = \frac{1}{\alpha_D} : \frac{1}{k_i} = \frac{k_i}{\alpha_D}.$$

Для разных областей горения характерны следующие пределы значений суммы диффузионно-кинетических критериев:

$N_1 + N_2 < 0,1$  – кинетическая область горения;

$N_1 + N_2 > 10$  – диффузионная область горения;

$0,1 < N_1 + N_2 < 10$  – переходная область горения.

В заключение, отметим факторы, определяющие скорость и интенсивность процесса горения:

- скорость химической реакции (константа скорости реакции и энергия активации);
- температура в зоне активного горения (ЗАГ);
- время пребывания частиц в ЗАГ;
- концентрация кислорода в ЗАГ, интенсивность подвода окислителя в ЗАГ, интенсивность диффузионного массообмена между частицами топлива и окислителя (коэффициент диффузионного массообмена);
- конструктивные особенности топки (камеры сгорания), аэродинамика топки;
- свойства топлива (выход летучих, влажность, зольность);
- размер частиц угольной пыли, тонкость помола, гранулометрический состав, полидисперсность;
- конструкция мазутной форсунки, тонкость распыла;
- etc.

## 7. Способы сжигания топлива

В теплоэнергетических установках топливо сжигается либо **в слое**, либо **в объеме** топочной камеры (камеры сгорания). В слое может сжигаться только твердое топливо, в объеме – газ, мазут и твердое топливо в пылевидном состоянии (рис. 7.1).

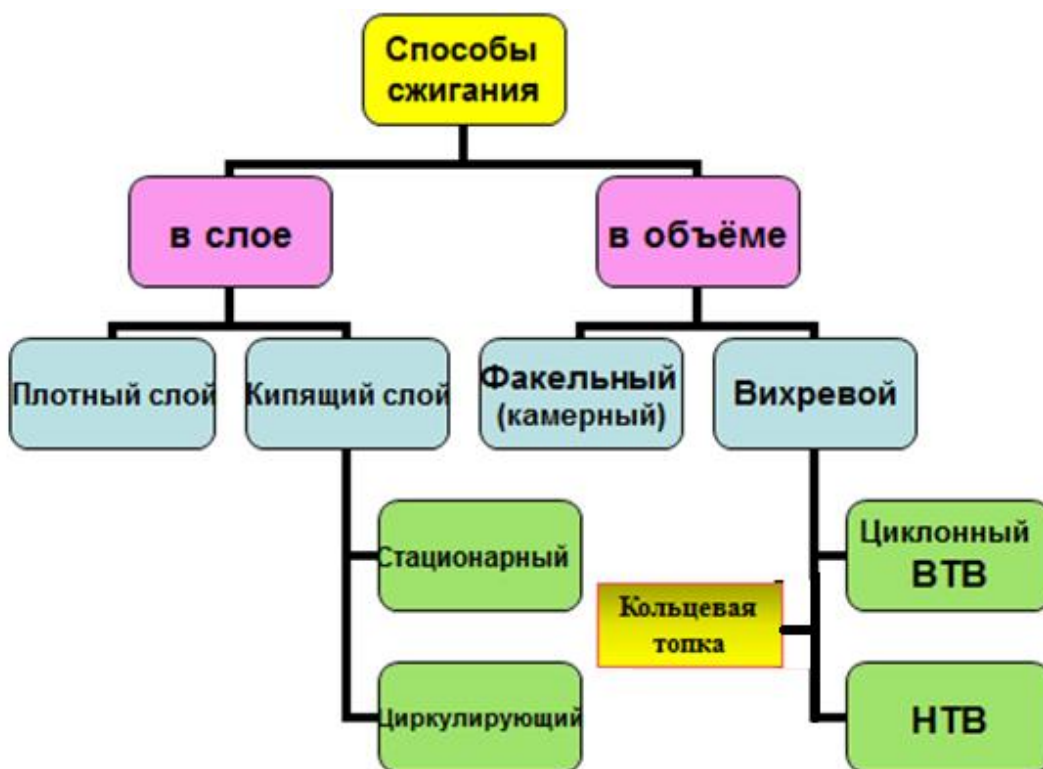


Рис. 7.1. Способы сжигания топлива

### 7.1. Слоевое сжигание

При **сжигании в плотном слое** (рис. 7.2) твердое топливо, загруженное слоем определенной толщины (высоты) на распределительную колосниковую решетку, поджигается и продувается (как правило, снизу вверх) воздухом. Основное горение происходит в слое, образованном кусками топлива. Над слоем в объеме 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 газозадушного потока в слое ограничивается пределом устойчивости его залегания. Увеличение скорости воздуха (а, следовательно, и скорости дымовых газов) сверх определенного 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 объеме топki, что вызывает увеличение потерь теплоты с механическим недожогом  $q_4$ .

Зона, в пределах которой практически полностью расходуется кислород воздуха, подаваемого под слой, называется **кислородной** (рис. 7.3): ее высота составляет два-три диаметра кусков топлива  $h_{\text{кисл}} = (2 \div 4)\delta_k$ .

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

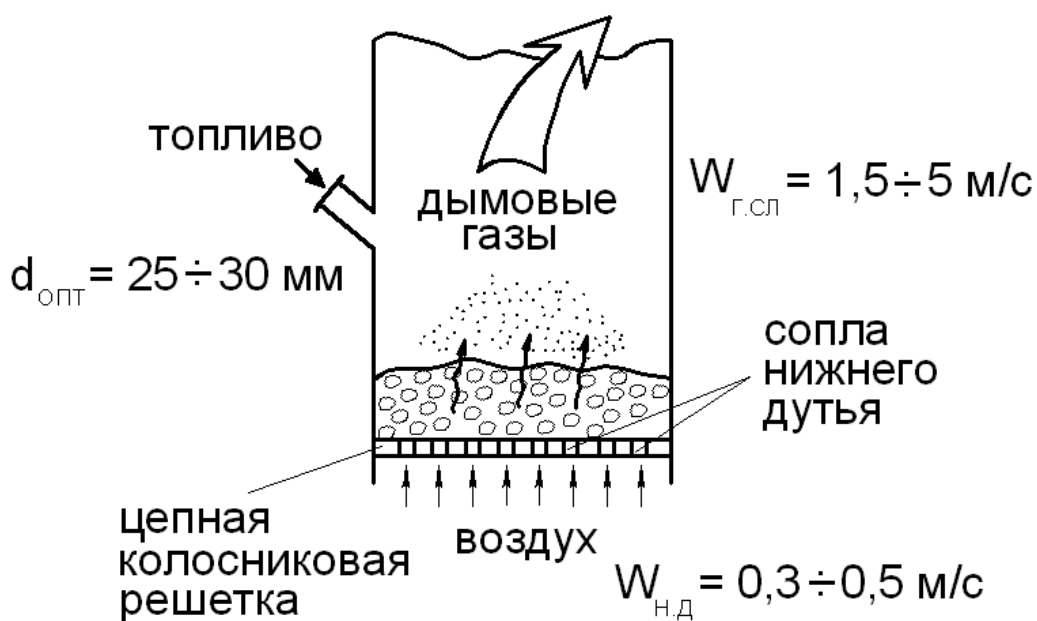


Рис. 7.2. Сжигание в плотном слое

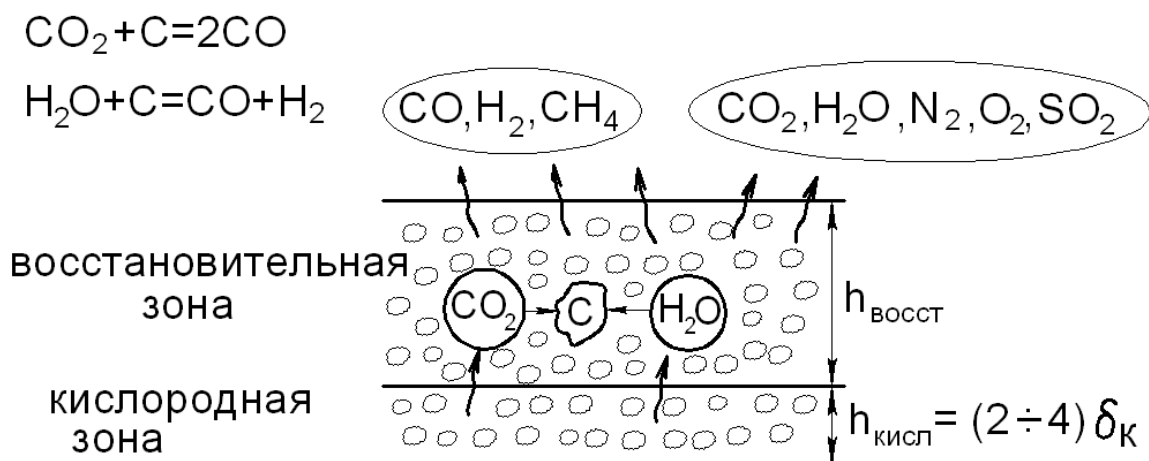


Рис. 7.3. Слой топлива

В этом случае в состав дымовых газов, наряду с  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{N}_2$ , входят и горючие газы  $\text{CO}$  и  $\text{H}_2$ , образовавшиеся не только в процессе выхода летучих, но и в результате восстановительных реакций  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ , причем их концентрация возрастает по мере увеличения высоты восстановительной зоны.

В слоевых топках высоту слоя следует поддерживать либо равной высоте кислородной зоны, либо несколько большей ее. Для дожигания выносимой из слоя в топочный объем мелкодисперсной угольной пыли и продуктов неполного сгорания ( $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$ ) 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 решетке. Шуровка слоя необходима для удаления шлака и разрушения спеков (при сжигании спекающихся углей). В немеханизированных топках, где все три операции осуществляются вручную, можно сжигать угля не более 400 кг/ч.

В промышленной теплоэнергетике большое распространение получили слоевые топки с пневмомеханическими забрасывателями и цепной решеткой обратного хода (рис. 7.4).

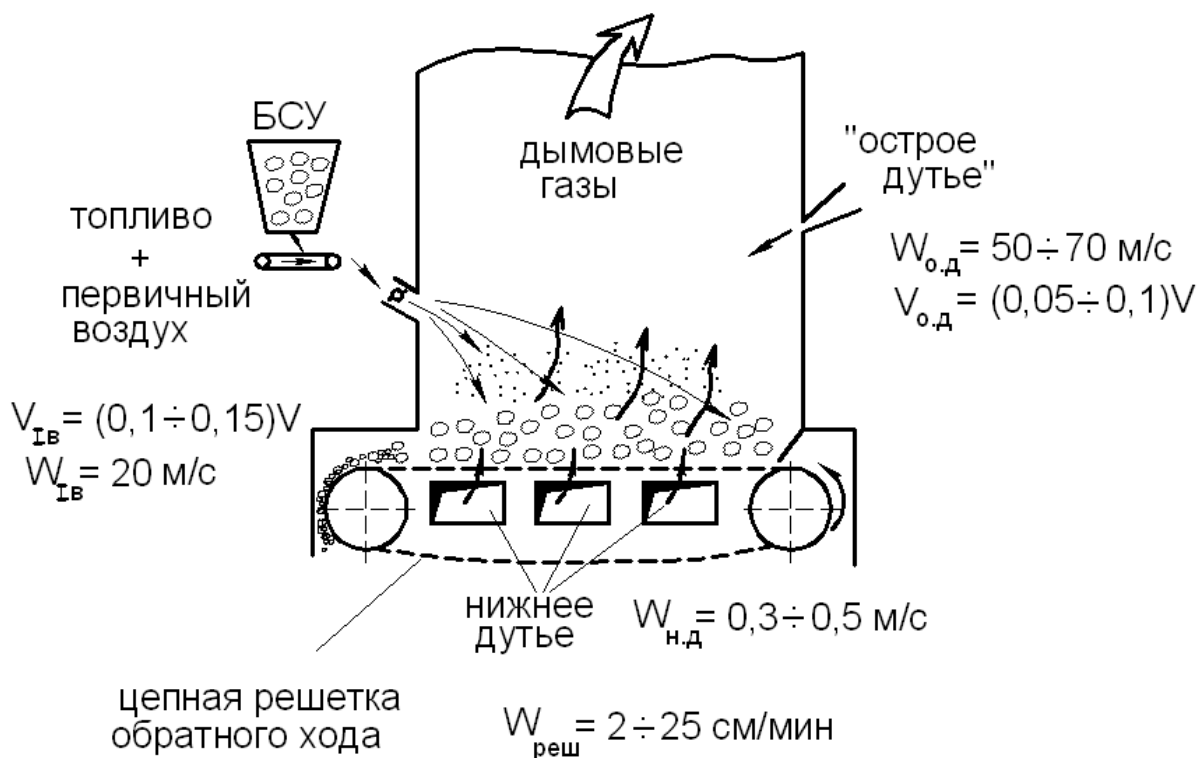


Рис. 7.4. Полумеханическая топка обратного хода

Топливо подается 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 решетку, сконструированную в виде полотна транспортной ленты. Полотно решетки состоит из отдельных колосниковых элементов, закрепленных на бесконечных шарнирных цепях, приводимых в движение «звездочками». Воздух для горения подается специальными соплами через зазоры между элементами колосников. По законам инерции более крупные куски летят к задней стенке, и время их пребывания на решетке, а, следовательно, и время горения, больше. Самые мелкие фракции (размер частиц меньше 1 мм) сгорают в топочном объеме на лету, для чего специально подается воздух (10 ÷ 15 % от общего расхода) со скоростью порядка 20 м/с.

Для интенсификации горения в топочном объеме через сопла, расположенные в задней стенке, дополнительно подается воздух (5 ÷ 10 % от общего расхода) в виде струй «острого дутья» со скоростью 50 ÷ 70 м/с.

Как правило, вместе с «острым дутьем» 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)  $W_{\text{г}} = 1,5 \div 2,5$  м/с, что соответствует скорости нижнего дутья  $W_{\text{н.д}} = 0,3 \div 0,5$  м/с.

**Преимуществами** слоевых топок являются:

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

**К недостаткам** слоевого способа сжигания относятся:

- 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 твердое топливо;
- проблематичность (невозможность) сжигания топлива с очень высокой зольностью и влажностью.

## 7.2. 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. 7.5).

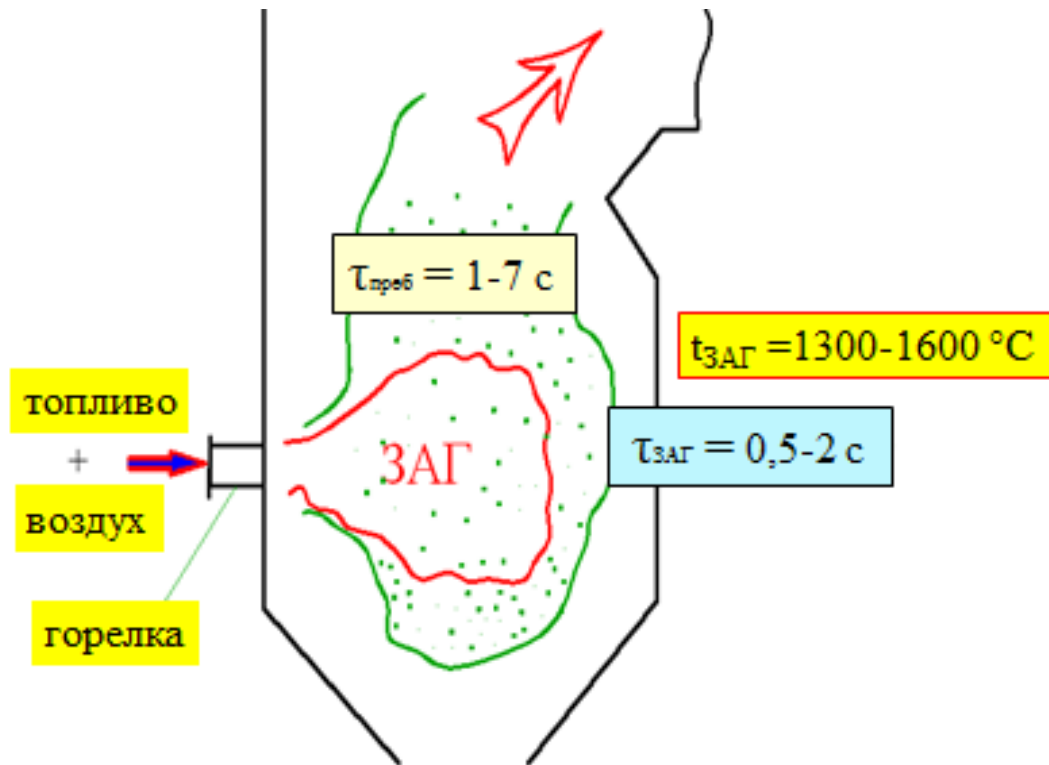


Рис. 7.5. Факельный способ сжигания

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 объем топочной камеры. Температура в зоне активного горения (ЗАГ) порядка  $1300 \div 1600\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Продолжительность пребывания частиц топлива в зоне активного горения от 0,5 до 2 с. Для обеспечения полного выгорания топлива за такое короткое время твердое топливо перед поступлением в топку предварительно подсушивают и тщательно размалывают до пылевидного

состояния, а жидкое — распыляют с помощью форсунок до мельчайших капель.

Твердое топливо измельчается в мельничных устройствах и вдувается в топочную камеру через **пылеугольные горелки** (рис. 7.6).

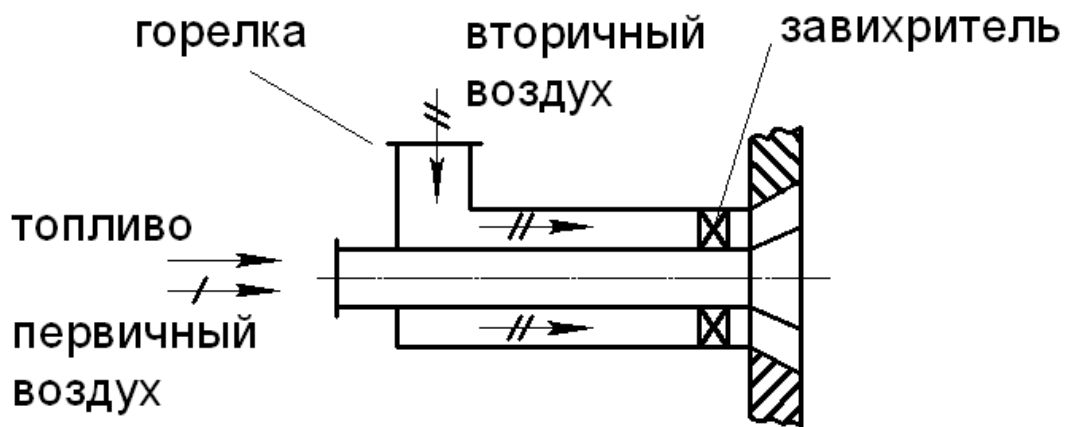


Рис. 7.6. Вихревая пылеугольная горелка

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 определенная 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 объеме.

При камерном сжигании угольной пыли летучие вещества, выделяющиеся в процессе ее прогрева и термического разложения, сгорают в факеле, образуя с воздухом гомогенную смесь, что способствует разогреву твердых частиц (кокса) до температуры воспламенения, а также стабилизирует факел. Первичный воздух должен обеспечить сжигание летучих, поэтому его количество  $V_{IV}$  (доля от общего объема воздуха) определяется выходом летучих веществ. Для углей с малым выходом



летучих (например, антрацита или тощего угля, температура воспламенения которых от 800 до 1000 °С) доля первичного воздуха  $V_{IВ} = (0,15 \div 0,25) \cdot V$ , а для топлив с высоким выходом летучих (бурых углей с температурой воспламенения от 550 до 600 °С)  $V_{IВ} = (0,2 \div 0,55) \cdot V$ .

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

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 счет кислорода вторичного воздуха.

Изложенная схема факельного способа сжигания угольной пыли, безусловно, является упрощенной, 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.

### **7.2.1. Расположение горелок на стенках топочной камеры**

Интенсивность процессов горения, тепло- и массообмена, а, следовательно, и условия надежной 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. 7.7).

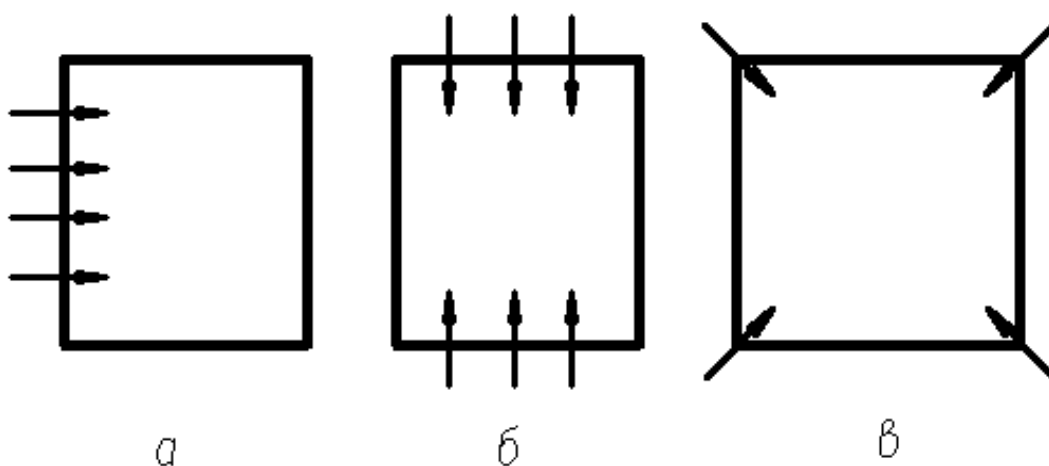


Рис. 7.7. Схемы расположения горелок в топочной камере:

*a* – фронтальное; *б* – встречное; *в* – угловое

При фронтальном расположении горелок (рис. 7.7*a*) струи, истекающие из отдельных горелок, первоначально развиваются самостоятельно, а затем сливаются в единый поток (рис. 7.8).

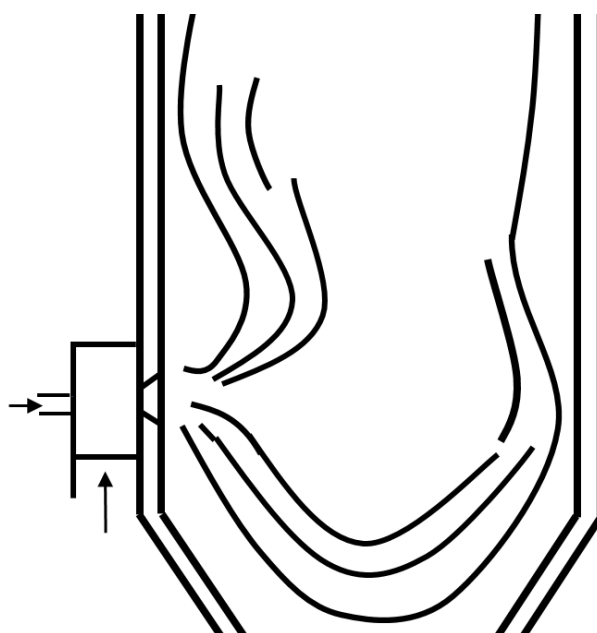


Рис. 7.8. Фронтальное расположение горелок

По мере распространения струя подсасывает (эжектирует) топочные газы, масса ее значительно увеличивается, а концентрация окислителя снижается. Во избежание касания струей противоположной (задней) стенки топочной камеры при фронтальном расположении целесообразно использование **вихревых горелок**, которые дают относительно короткий факел.

При **встречном** расположении (рис. 7.7б) горелки устанавливаются либо на противоположных боковых стенках, либо на фронтальной и задней, причем возможна как **встречно-лобовая**, так и **встречно-смещенная** компоновка.

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 (рис. 7.9). При неравенстве импульсов встречных потоков возникает асимметричность течения, и результирующий факел может приблизиться к одной из стен.

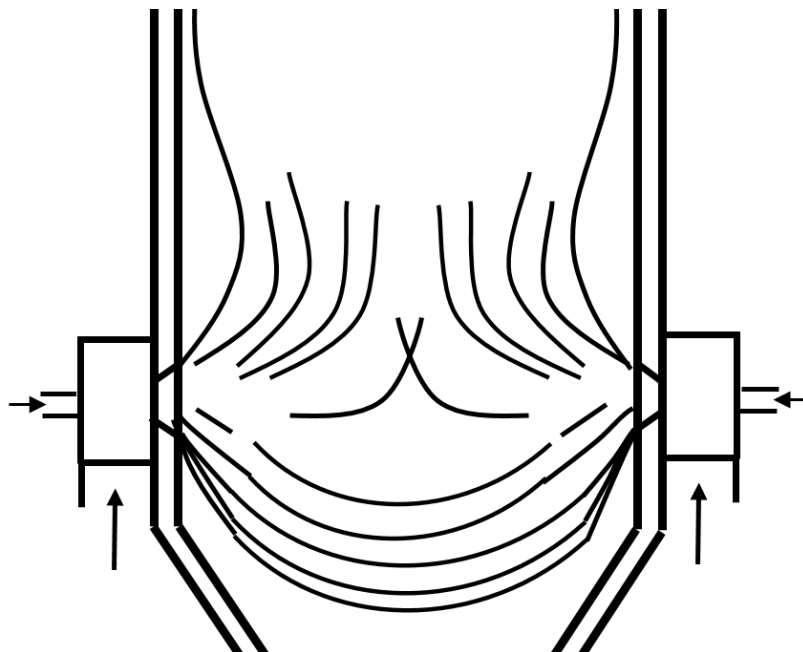


Рис. 7.9. Встречно-лобовая компоновка горелок

При **встречно-смещенной** компоновке горелок потоки взаимно проникают друг в друга, при этом происходит лучшее заполнение факелом топочного объема, выравнивается поле температур, обеспечивается интенсивный подвод теплоты к корню факела, стабилизируется воспламенение.

При **угловом** расположении горелок (рис. 7.7в) возможны следующие схемы их установки (рис. 7.10): **диагональная, блочная, тангенциальная**. Подобные компоновки также имеют ряд преимуществ, аналогичных встречно-смещенной компоновке.

Схема распространения струй при тангенциальном расположении горелок представлена на рис. 7.11.

Еще более интенсифицируются процессы тепло- и массопереноса за счет 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.

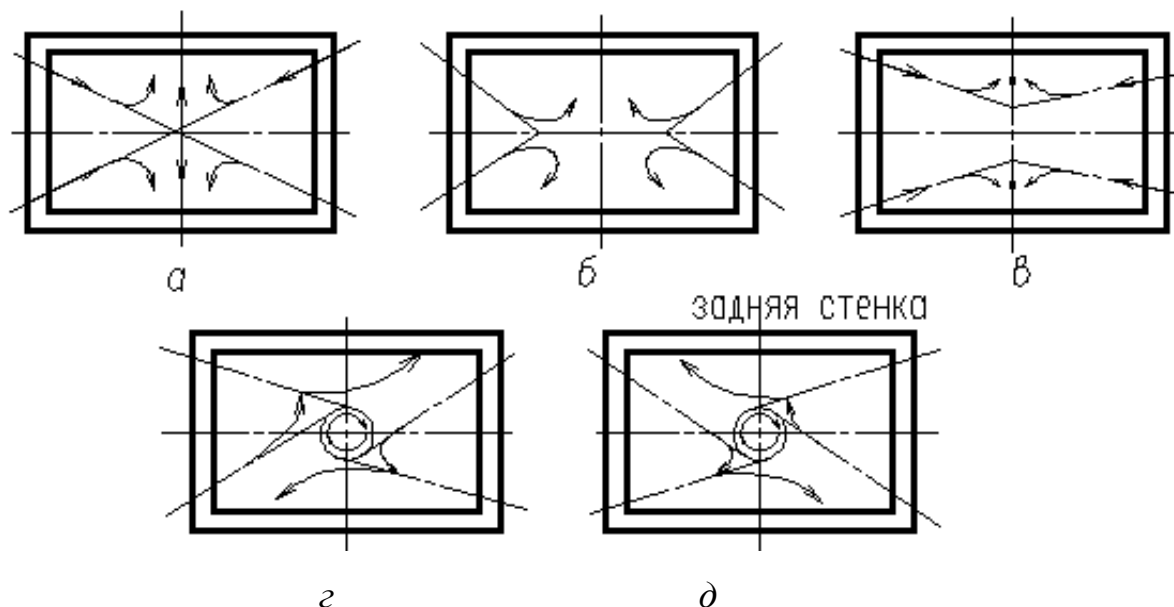


Рис. 7.10. Схемы угловой установки горелок:  
а – диагональная; б, в – блочная; г, д – тангенциальная

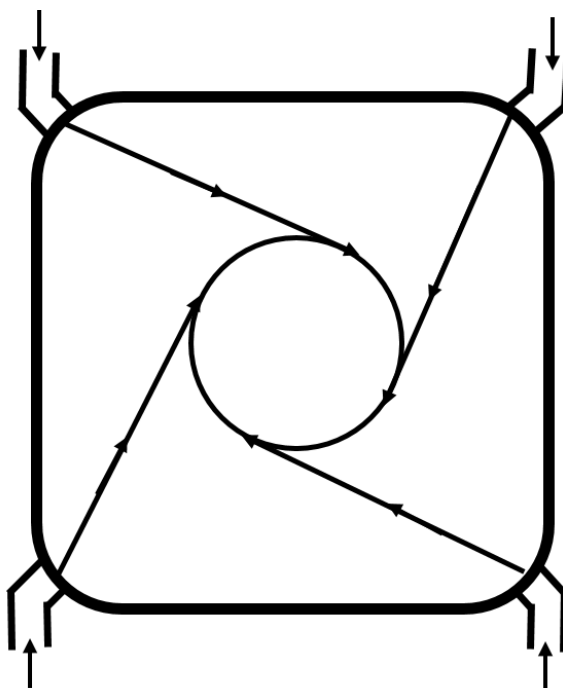


Рис. 7.11. Тангенциальное расположение горелок

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. 7.12).

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. 7.12, кривая *a*).

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. 7.12, кривая *б*).

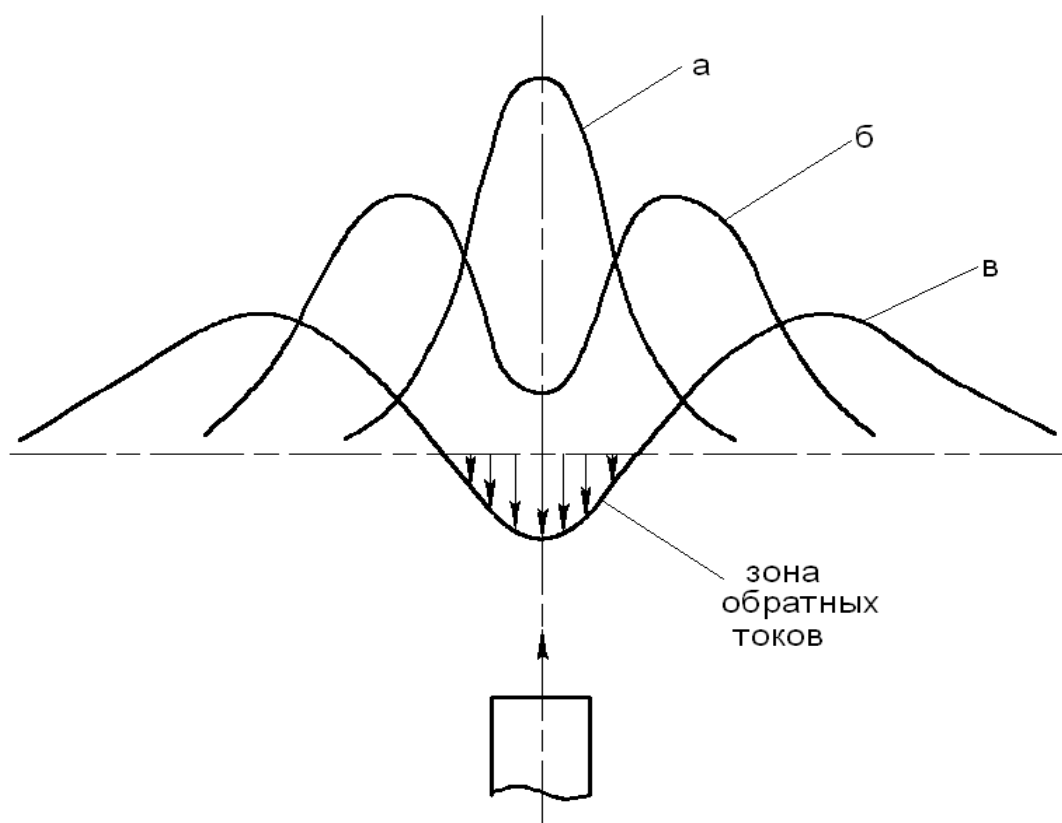


Рис. 7.12. Изменение профиля осевой составляющей скорости в околорелочной области:

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

Последующее увеличение крутки приведет к тому, что силы сжатия превысят осевой импульс потока вблизи оси и вынудят повернуть осевой поток в обратном направлении (рис. 7.12, кривая в).

Образующийся в **околорелочной** области **обратный вихрь** играет важнейшую роль, в первую очередь, при стабилизации вихревого пламени, поскольку за счет эффекта **внутренней рециркуляции** (рис. 7.13) происходит подсос горячих дымовых газов в корень факела, в отличие от прямоточных горелок, которые эжектируют горячие газы только с внешней (периферийной) поверхности.

На рис. 7.14 представлены модельные снимки свободно распространяющегося пламени вихревой осесимметричной горелки при

различных углах крутки вторичного воздуха в сравнении с пламенем незакрученного параллельноструйного потока.

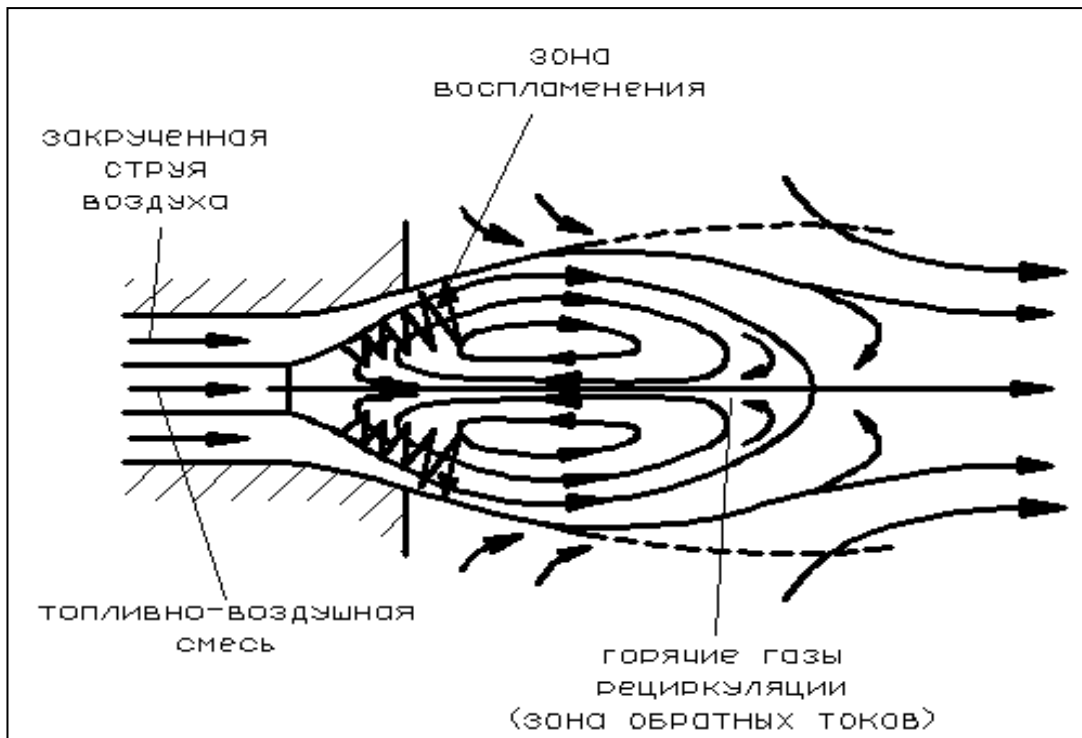


Рис. 7.13. Зона обратных токов на выходе из вихревой горелки

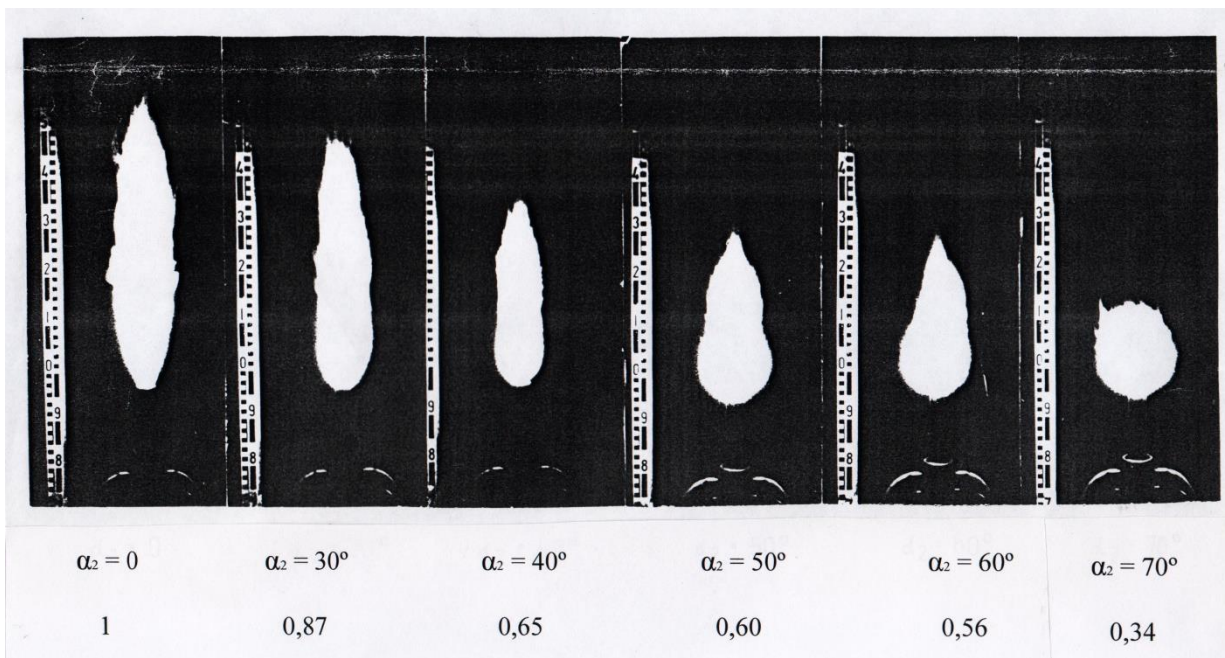


Рис. 7.14. Длина газового факела вихревой горелки  $L_{\text{вихр}}$  при различных углах крутки вторичного воздуха  $\alpha_2$  в сравнении с прямоточным факелом  $L_{\text{пр}}$

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».

В результате, истекающий в топочное пространство поток образует мощный турбулентный закрученный факел, на оси которого создается разрежение, что обеспечивает подсос большого количества раскаленных 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 ее воспламенение, т. е. стабилизирует факел.

Размер зоны внутренней рециркуляции (зоны обратных токов) и ее 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 надежности 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;

- надежная эксплуатация при низких коэффициентах избытка воздуха (даже при сжигании угольной пыли  $\alpha = 1,15 \div 1,2$ );

- пониженный механический недожог.

К недостаткам следует отнести:

- 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).

### 7.3. Сжигание в кипящем слое

Устойчивое горение пылеугольного факела возможно только при высокой температуре в ядре факела – не ниже  $1300 \div 1600$  °С. В этом диапазоне температур заметно возрастает скорость образования «термических воздушных» оксидов азота (подробнее об оксидах азота  $\text{NO}_x$  будет изложено в «Экология в энергетике») по реакции:



В атмосфере оксид азота  $\text{NO}$  доокисляется до высокотоксичного диоксида  $\text{NO}_2$ , предельно допустимая (безопасная для людей) концентрация (ПДК) которого в приземном слое не должна превышать  $0,085$  мг/м<sup>3</sup>. 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  $\text{SO}_2$ , 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  $850 \div 950$  °С. При этих температурах скорость образования оксида азота по реакции (7.1) незначительна, а диоксид серы соединяется с оксидами кальция и магния, входящими в минеральную часть топлива, по реакции (аналогичным образом реагирует и  $\text{MgO}$ ):



Если содержание оксидов кальция и магния в золе недостаточно для связывания всего  $\text{SO}_2$  (как правило, необходим двух- или трехкратный его избыток по сравнению со стехиометрическим соотношением по реакции (7.2)), к топливу подмешивается известняк  $\text{CaCO}_3$ . При температуре около 900 °С известняк интенсивно разлагается на  $\text{CaO}$  и  $\text{CO}_2$ , а гипс  $\text{CaSO}_4$  не разлагается, т. е. реакция (7.2) необратима. Таким образом, токсичный  $\text{SO}_2$  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 удастся 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 (псевдооживленным)** 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 объеме создает впечатление бурно кипящей жидкости, сам слой приобретает некоторые ее свойства, и его поведение подчиняется законам гидростатики, что и объясняет происхождение названия.

Если в камере сгорания (рис. 7.15а) установить решетку, на которую поместить слой угля, и к решетке подать в небольшом количестве воздух, то после предварительного разогрева слоя начнется горение топлива с поверхности с выделением газообразных продуктов сгорания. При восполнении сгорающего топлива, т. е. при непрерывной подаче топлива, на решетке будет поддерживаться фиксированный горящий слой (**слоевое сжигание топлива**).

Если увеличивать подачу воздуха под решетку, то на частицы топлива, находящегося на решетке, 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 подъемном потоке воздуха, а толщина горящего слоя возрастет (рис. 7.15б). Переход неподвижного слоя в кипящий происходит при такой скорости оживающего агента, когда

гидродинамическое давление потока  $P$  уравнивает силу тяжести  $G$ , действующую на частицы (рис. 7.16). Минимальную скорость, при которой начинается псевдооживление, называют **первой критической скоростью**  $W_{кр1}$ .

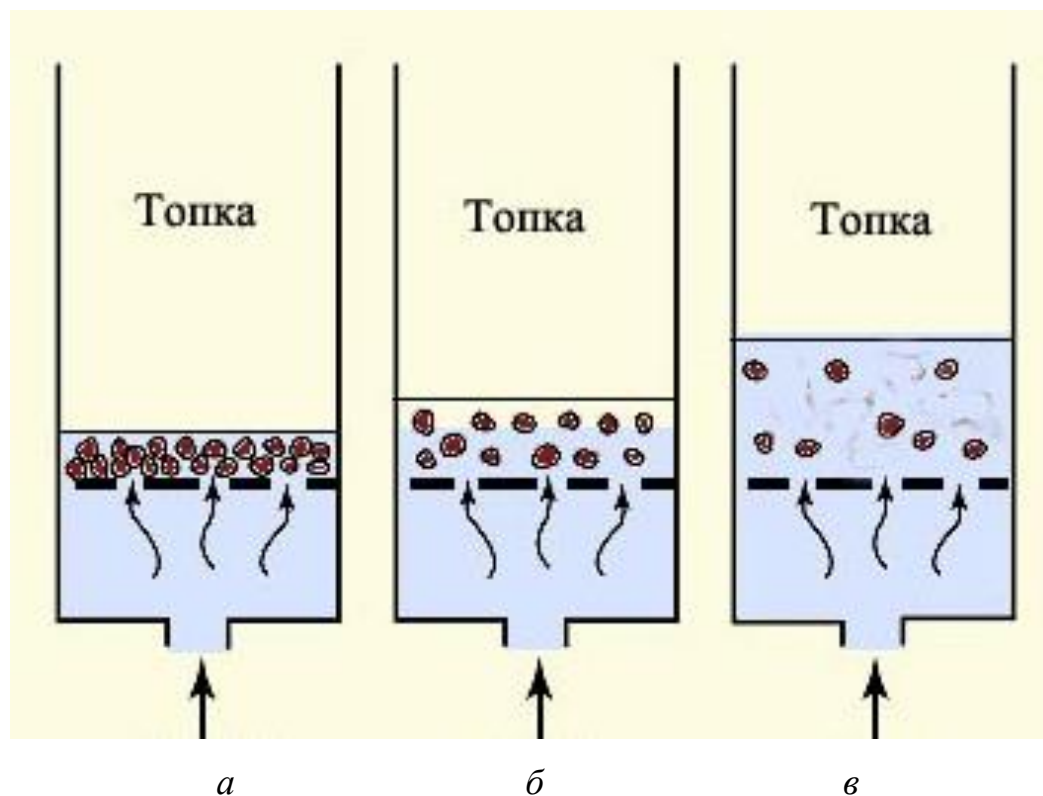


Рис. 7.15. Изменение слоя топлива при различных скоростях нижнего дутья

При дальнейшем увеличении скорости толщина слоя еще больше возрастает. Создается впечатление, что слой топлива «кипит». Это так называемый **стационарный пузырьковый кипящий слой** (рис. 7.15в, 7.16).

При еще большей скорости воздуха подъемная 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**  $W_{кр2}$ .

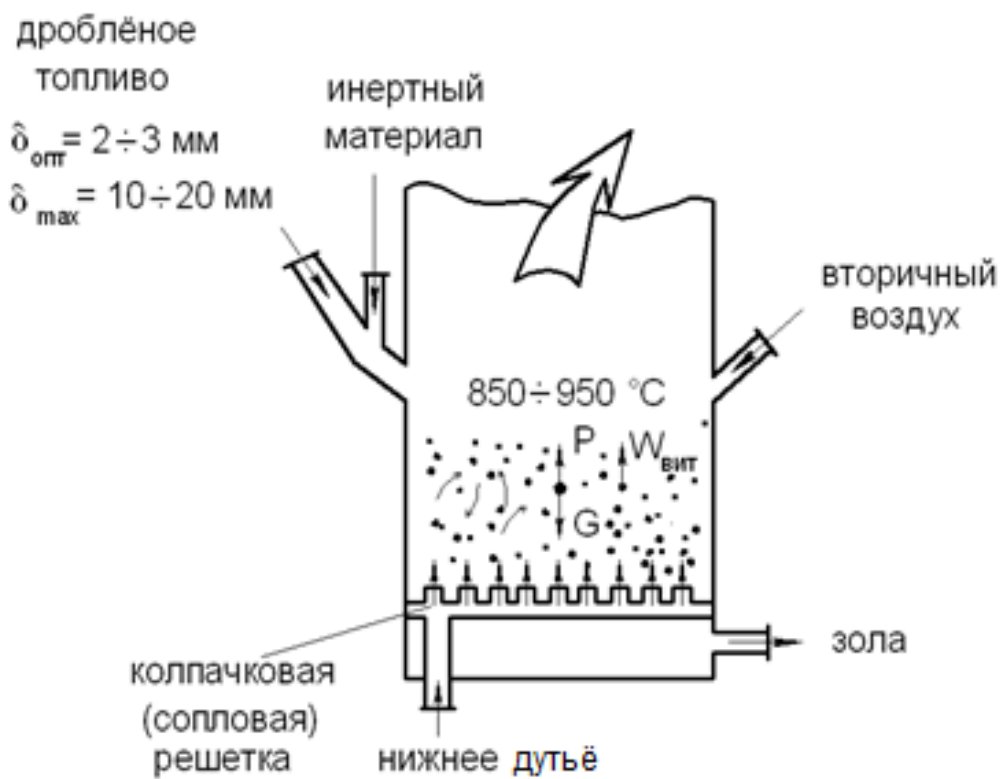


Рис. 7.16. Стационарный кипящий слой (СКС)

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 высокозольных углей). Интенсивное перемешивание твердых частиц под воздействием оживающего 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. 7.16) подаются известняк, песок, гранулированная зола или другой зернистый (инертный) материал, образующий с дробленным углем (размер частиц  $1,5 \div 6$  мм) суспензионный кипящий слой под действием восходящего потока воздуха, поступающего через сопла, расположенные в колпачковой решетке в нижней части топки.

Поддержание температуры кипящего слоя в необходимых пределах ( $850 \div 950$  °С) и организация самого процесса «кипения» как раз и осуществляются за счет того, что вместе с топливом подается 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 объему (по высоте и сечению) кипящего слоя и, как следствие, высокие значения коэффициента теплоотдачи к поверхностям теплообмена.

Технология кипящего слоя позволяет сжигать дробленое топливо с размером частиц до  $10 \div 20$  мм (при сжигании древесных отходов – до 35 мм) при среднем оптимальном размере частиц  $\delta_{\text{ср}} = 2 \div 3$  мм. Такому размеру частиц соответствует рабочая оптимальная скорость псевдооживления (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. 7.17).

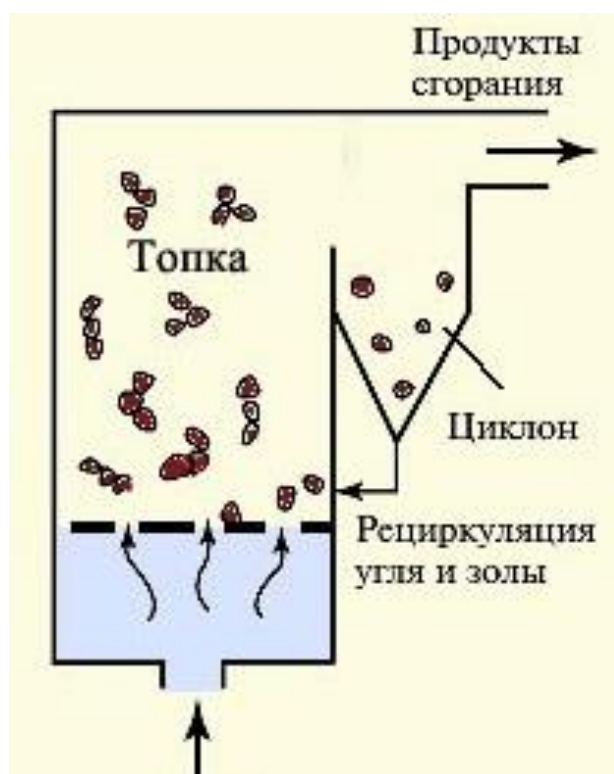


Рис. 7.17. Циркулирующий кипящий слой (ЦКС)

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.

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

- более высокий коэффициент конвективного теплообмена;
- длительное пребывание частиц в слое позволяет сжигать дробленое 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  $900 \div 950$  °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 твердого 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 освоен 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  $SO_2$ ;
- обжига различных руд и их концентратов (цинковых, медных, никелевых, золотосодержащих);
- термического обезвреживания различных вредных веществ (твердых, жидких и газообразных), например, шламов осветления сточных вод, городского мусора, бытовых отходов и т. д.

## **7.4. Вихревые топки**

### **7.4.1. Высокотемпературное вихревое сжигание**

Высокотемпературное вихревое сжигание (ВТВ) осуществляется в **циклонно-вихревых топках** (рис. 7.18). Этот способ также позволяет сжигать газообразное, жидкое и дробленое твердое топливо (с размером частиц, как правило, до 5 мм).

Перед основной топкой (камерой догорания) монтируется циклонный предтопок (обычно неэкранируемый). Смесь топлива с первичным воздухом подается по оси предтопка, а вторичный воздух – по касательной к образующей циклона со скоростью около 100 м/с. Таким образом создается 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.

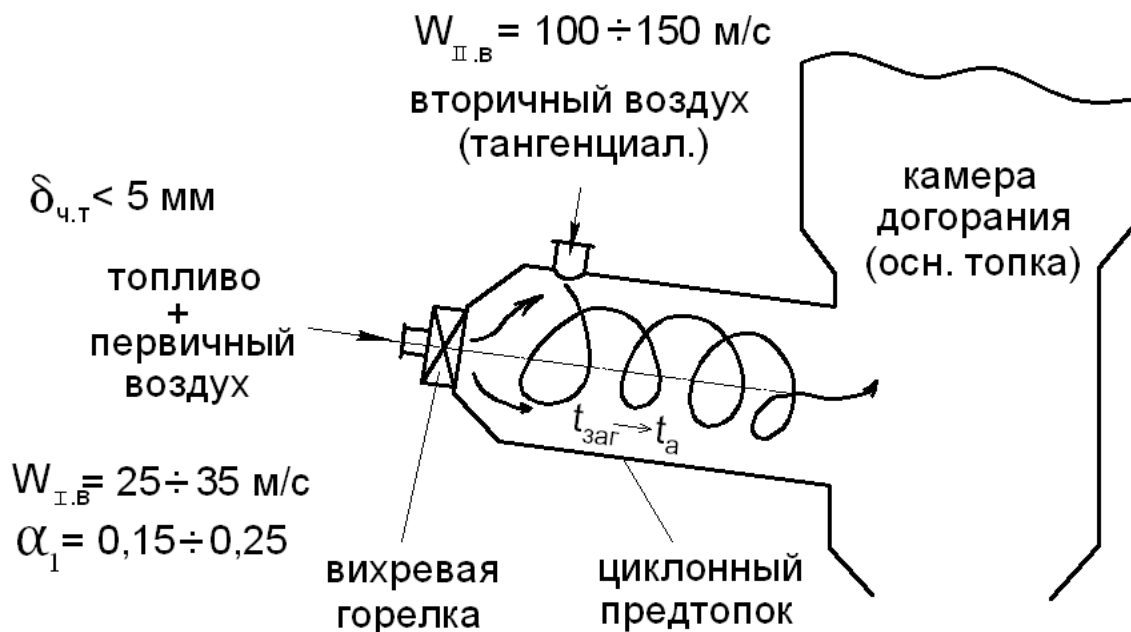


Рис. 7.18. Высокотемпературное вихревое сжигание

Циклонно-вихревые камеры предвключаются к основному топочному объему, 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.

#### 7.4.2. Низкотемпературное вихревое сжигание

Другой разновидностью вихревого сжигания является **низкотемпературный вихревой (НТВ) способ сжигания**, разработанный профессором В.В. Померанцевым (рис. 7.19).

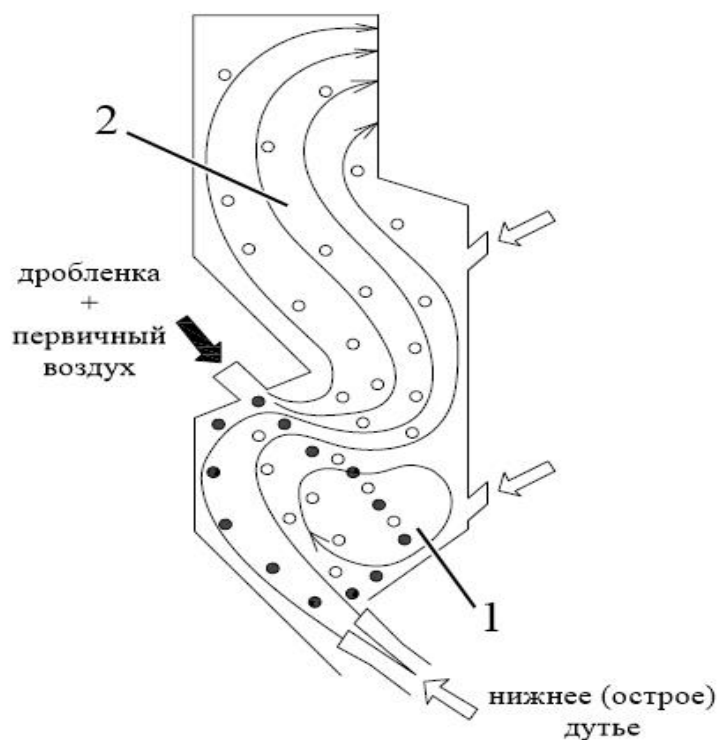


Рис. 7.19. Низкотемпературная вихревая топка Померанцева:

1 – вихревая зона; 2 – прямоточная зона

В основу НТВ-технологии заложен принцип организации низкотемпературного сжигания грубодробленого 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 объем 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.

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  $100 \div 300$  °С), 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  $1100 \div 1250$  °С. Вихревая зона топки является практически *изотермичной*. При таком температурном уровне образуются, в основном, топливные оксиды азота, количество воздушных оксидов азота ничтожно мало (см. раздел «Экология в энергетике»). 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 удается 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 ( $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ )

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 ÷ 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, переведенных 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 угрубление 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 прошла промышленные испытания на широкой гамме твердых топлив, таких как торф, бурые и каменные угли, горючие сланцы, отходы деревообработки и микробиологического производства.

#### ***Достоинства НТВ-сжигания***

Применение НТВ-технологии позволяет:

- упростить систему подготовки топлива (возможность сжигать дробленый уголь с размером частиц до  $20 \div 30$  мм или угольную пыль грубого помола), увеличить ее 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  $15 \div 20$  %;

- создавать малогабаритные котлы большой мощности;

- исключить шлакование и загрязнение топочных и конвективных поверхностей нагрева;

- обеспечить снижение выбросов оксидов азота  $\text{NO}_x$  на  $20 \div 50$  %;
- обеспечить снижение выбросов оксидов серы  $\text{SO}_x$  на  $20 \div 40$  % за счет их связывания с основными оксидами золы ( $\text{CaO}$  и  $\text{MgO}$ ) при благоприятных внутритопочных условиях;
- обеспечить более глубокое связывание оксидов серы за счет ввода в вихревую топку  $\text{CaO}$ -содержащих добавок.

***Недостатки НТВ-сжигания:***

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

**7.4.3. Кольцевая топка**

Кольцевая топка (рис. 7.20) представляет собой восьмигранную вертикальную экранированную призму, внутри которой по всей высоте соосно установлена восьмигранная экранированная вставка.

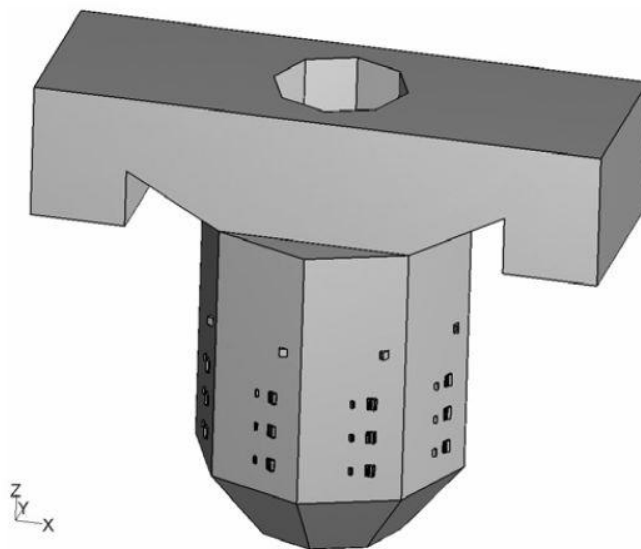


Рис. 7.20. Общий вид кольцевой топочной камеры  
(для Т-образного котлоагрегата)

Поперечный размер этой вставки составляет 50 – 60 % поперечного размера наружной камеры. Стены внутренней и наружной камер состоят из газоплотных сварных панелей. При таком решении вращающийся факел оказывается как бы зажатым в кольцевом пространстве между внутренними и наружными экранами. Система сжигания такова, что пламя не просто горит, а как бы бежит по спирали (рис. 7.21).

Технические решения по внедрению кольцевой топки проработаны с учетом 10-летнего опыта успешной работы котла Е-820 с кольцевой топкой на Ново-Иркутской ТЭЦ (г. Иркутск) (рис. 7.22).

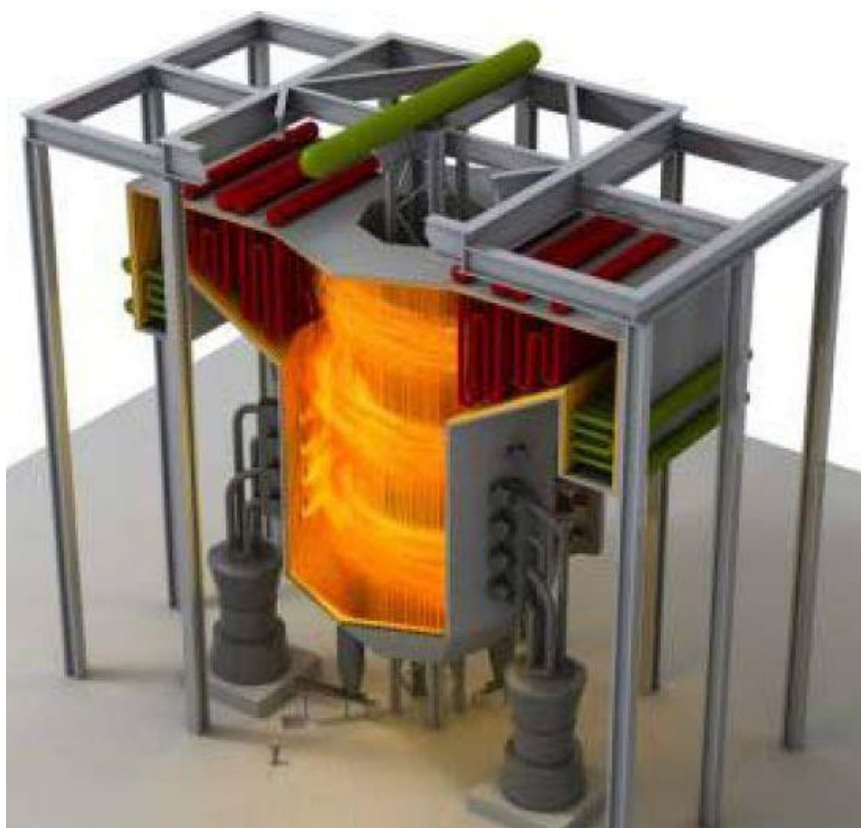


Рис. 7.21. Движение вращающегося факела

Топка оборудуется прямоточными горелками, расположенными в несколько ярусов – по одному горелочному блоку на каждой наружной грани топки (рис. 7.23).



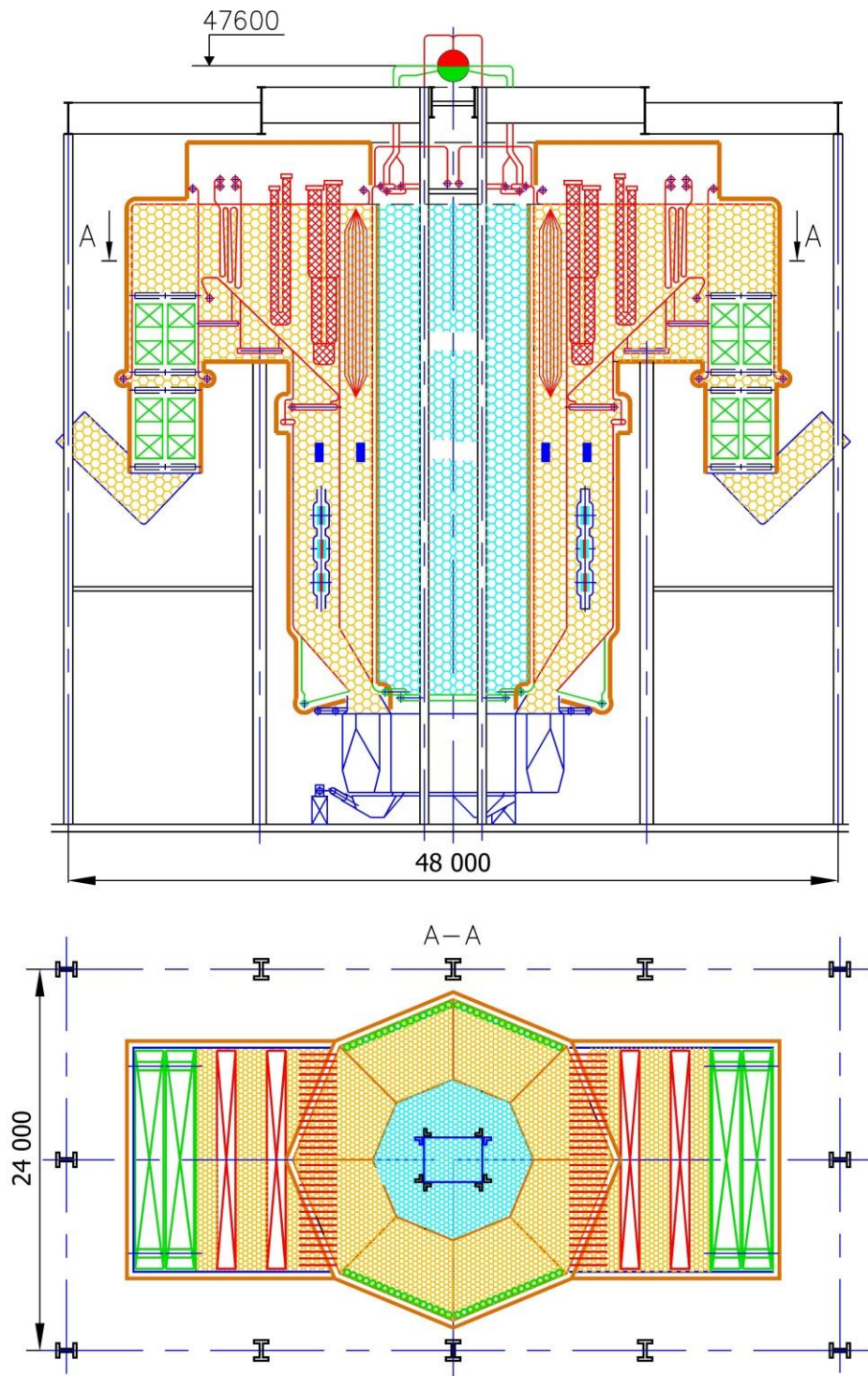


Рис. 7.22. Котел Е-820 с кольцевой топкой

Для обеспечения вращательного течения в горизонтальном сечении оси горелок направлены по тангенциальной схеме. В кольцевой топке используются специальные регулируемые горелки, обеспечивающие возможность изменения направления ввода в топку горелочных струй. Это

позволяет сравнительно легко настроить положение вращающегося факела без активного касания его внутренней и наружной камер. Факел одной горелки поджигает факел следующей горелки, что обеспечивает надёжное воспламенение и устойчивую работу топки в целом.

Для дополнительного снижения выбросов  $\text{NO}_x$  часть вторичного воздуха вводится в топку через сопла, расположенные как на уровне расположения горелок (см. рис. 7.23), так и в зоне выше горелок. При этом для уменьшения крутки газов перед их входом в конвективные газоходы верхний ввод воздуха организован по тангенциальной схеме с направлением противоположным вращению основного потока топочных газов.

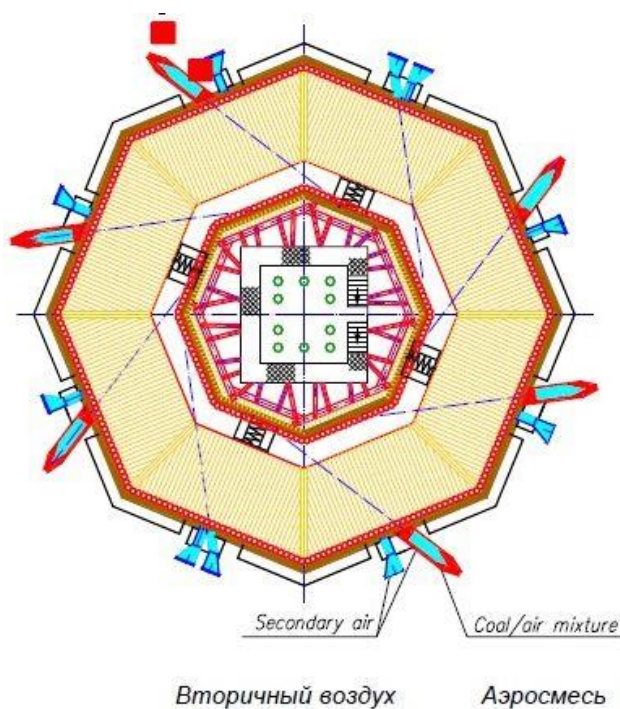


Рис. 7.23. Расположение горелок внутри кольцевой топочной камеры

Этот котел был разработан и изготовлен в соответствии с правительственной программой для отработки решений по созданию котлов с уменьшенными габаритами для крупных энергоблоков.

Применение кольцевых топок для мощных котлов позволяет уменьшить их высоту и за счет этого сократить металло- и капиталоемкость котлов (рис. 7.24).

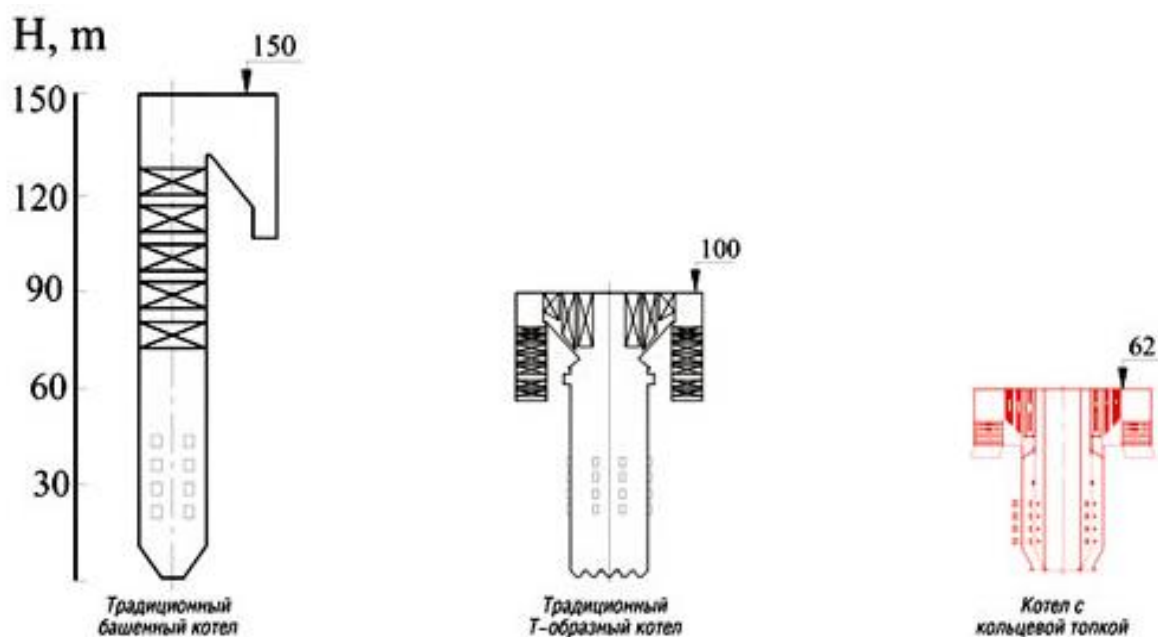


Рис. 7.24. Сравнение высоты башенного котла, котла с Т-образной компоновкой и котла с кольцевой топкой

### Заключение

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 – еще и газы рециркуляции). Реже применяются циклонно-вихревой способ, низкотемпературный вихрь, кипящий слой и кольцевая топка.

## 8. Экология в энергетике

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 твердое, 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  $\text{CO}_2$ . Благодаря процессу фотосинтеза, протекающему в природе, зеленая 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 зеленые насаждения уже не справляются с гигантскими объемами диоксида углерода, выбрасываемого в атмосферу. При сжигании органического топлива ежегодно выделяется более 25 Гт  $\text{CO}_2$ , при этом лишь половина может быть поглощена благодаря природным процессам (фотосинтез и т. п.).

Рост концентрации  $\text{CO}_2$  приводит к нарушению теплового баланса между Землей и окружающей ее атмосферой, космическим пространством и Солнцем. В результате этого дисбаланса происходит постоянное и повсеместное потепление климата планеты. Так называемый «парниковый» эффект зафиксирован климатологами еще в XX веке.

*Мы все живем 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 объема выбросов  $CO_2$ , а российские леса «перерабатывают» около 25 % суммарного мирового поступления углекислого газа.

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 все 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 идет об углеродсодержащем топливе), при этом абсолютное количество выделившегося углекислого газа уменьшиться не может. Но дерево растет 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  $CO_2$ .

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

В зависимости от степени окисления образуются различные соединения азота с кислородом: гемеоксид  $N_2O$ , 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 нем 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<sub>NO<sub>2</sub></sub> в приземном слое воздуха составляет 0,085 мг/м<sup>3</sup>, в то время как для оксида азота ПДК<sub>NO</sub> = 0,6 мг/м<sup>3</sup>. При сгорании органического топлива образуется, главным образом, оксид азота NO, доля диоксида азота NO<sub>2</sub> составляет обычно 2 ÷ 5 % суммарного содержания оксидов азота NO<sub>x</sub>. Однако в шлейфе дымовых газов происходит дальнейшее окисление NO до более токсичного NO<sub>2</sub>, поэтому в директивных документах принято пересчитывать концентрацию NO в NO<sub>2</sub>.

Механизм окисления NO до NO<sub>2</sub> представляется в виде трех возможных реакций:



Для обычных условий распространения шлейфа дымовых газов в нижних слоях атмосферы наибольшее значение имеет окисление NO озоном, т. е. реакция (8.1).

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/м<sup>3</sup> может вызвать воспаление легких и бронхит, а при концентрациях 500 ÷ 1000 мг/м<sup>3</sup> возможен отек легких и летальный исход.

В табл. 8.1 приведены нормативы предельных выбросов в атмосферу оксидов азота для котельных установок.

Таблица 8.1

Нормативы предельных выбросов в атмосферу оксидов азота  $\text{NO}_x$  для котельных установок, введенные на ТЭС с 01.01.2001

Тепловая мощность котлов Q, МВт	Виды топлива	Размерность		
		г/МДж	кг/т у.т	мг/нм <sup>3</sup> сух. газа ( $\alpha=1,4$ )
100-299	Газ	0,043	1,26	125
	Мазут	0,086	2,52	250
	Бурый уголь	0,11	3,2	300
	Каменный уголь:			
	Твердое шлакоудаление	0,17	4,98	470
	Жидкое шлакоудаление	0,23	6,75	640
От 300 и выше	Газ	0,043	1,26	125
	Мазут	0,086	2,52	250
	Бурый уголь	0,11	3,2	300
	Каменный уголь:			
	Твердое шлакоудаление	0,13	3,81	350
	Жидкое шлакоудаление	0,21	5,97	570

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 водоемов, гибели лесных массивов. Проблема кислотных дождей усугубляется еще и тем, что в силу природных условий происходит

трансграничный перенос оксидов азота и серы. В связи с этим решение проблемы на национальном уровне невозможно.

Еще 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:

$$\frac{C_{\text{NO}_2}}{\text{ПДК}_{\text{NO}_2}} + \frac{C_{\text{SO}_2}}{\text{ПДК}_{\text{SO}_2}} \leq 1,0 \quad (8.4)$$

### 8.1. 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. 8.1).

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.



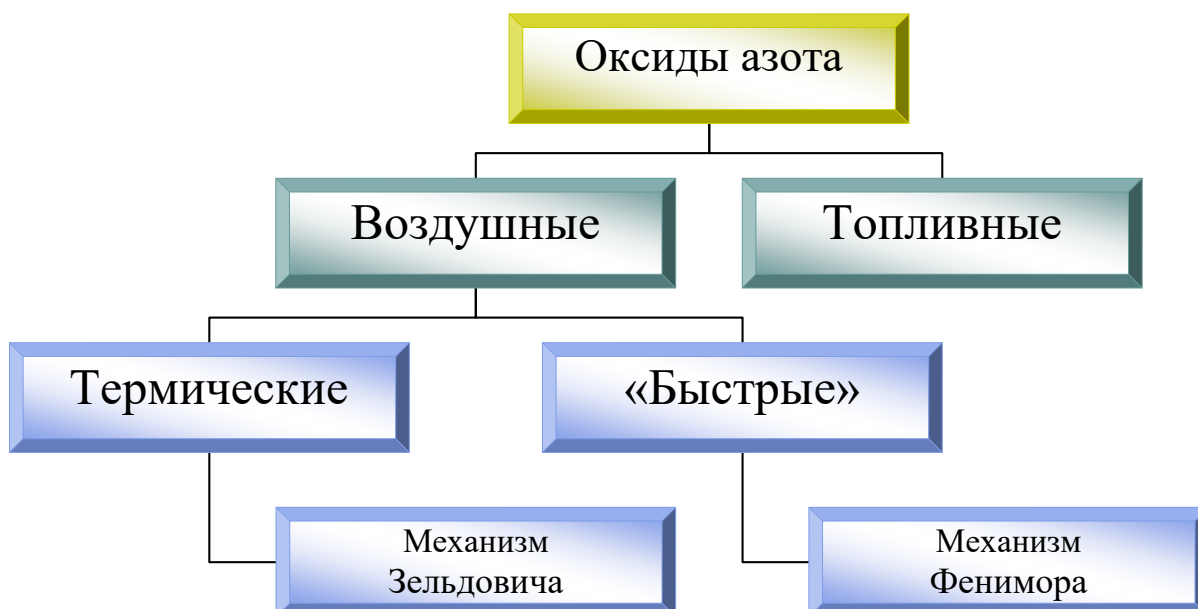


Рис. 8.1. Механизмы образования оксидов азота

Относительная роль каждого из трех источников образования  $\text{NO}_x$  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.

Для разработки эффективных способов снижения концентрации  $\text{NO}_x$  необходимо рассмотреть физико-химические основы образования различных категорий оксидов азота.

### 8.1.1. Термические оксиды азота

Согласно классической теории, реакция образования оксида азота имеет цепной механизм, в котором решающая роль отводится атомарному кислороду, образовавшемуся в результате диссоциации молекулярного кислорода при высоких температурах.

Термические оксиды азота могут образовываться и без процесса горения в чистом воздухе, если он нагрет до такой степени, что при

диссоциации кислорода могут образовываться свободные кислородные радикалы.

Энергетический барьер этой реакции складывается из двух составляющих:

- энергии, требующейся на образование одного атома кислорода ( $E_1$ );
- энергии активации реакции атома кислорода с молекулой азота ( $E_2$ ).

Таким образом

$$E = E_1 + E_2 = \frac{494}{2} + 314 = 561 \text{ кДж / кг} . \quad (8.5)$$

Так как энергия активации этой реакции очень высока, то она предопределяет исключительно сильную зависимость скорости образования оксида азота от температуры.

Формально-кинетическое уравнение скорости обратимой реакции образования и разложения оксида азота имеет вид:

$$\frac{dC_{NO}}{d\tau} = \frac{5 \cdot 10^{11}}{\sqrt{C_{O_2}}} \exp\left(-\frac{36 \cdot 10^4}{RT}\right) (C_{NO_{равн}}^2 - C_{NO}^2), \quad (8.6)$$

где равновесная концентрация NO

$$C_{NO_{равн}} = 8 \sqrt{\frac{C_{O_2} \cdot C_{N_2}}{3}} \exp\left(-\frac{9 \cdot 10^4}{RT}\right); \quad (8.7)$$

$C_{O_2}, C_{N_2}, C_{NO}$  – мгновенные текущие концентрации избыточного кислорода, азота и оксида азота, моль/л;  $\tau$  – время, с;  $T$  – температура в зоне реакции, К;  $R = 8,314$  – газовая постоянная, Дж/(К·моль);

энергия активации выражена в Дж/моль.

Время достижения равновесной концентрации оксида азота, рассчитанное по формуле Райзера :

$$\tau_{равн} = \frac{2,06 \cdot 10^{-12}}{\sqrt{N_2}} \exp\left(\frac{5730}{T}\right). \quad (8.8)$$

В диапазоне температур 1500÷1600 °С время достижения равновесных концентраций NO составляет примерно 4 ÷ 25 с. Время пребывания топливно-воздушной смеси (и соответственно, продуктов

сгорания) в зоне активного горения значительно меньше, т.е. в топках котельных агрегатов равновесные концентрации оксидов азота не достигаются.

### 8.1.2. «Быстрые» оксиды азота

Описанный выше механизм образования оксида азота отражает гомогенный процесс, протекающий за фронтом пламени после завершения процесса горения.

Несмотря на то, что время достижения равновесных концентраций NO при горении стехиометрической метановоздушной смеси – порядка  $10^{-2} \div 10^{-3}$  с, а время горения составляет  $10^{-4}$  с, в углеводородном пламени (в отличие от пламени  $H_2$  и CO) непосредственно в зоне горения обнаруживаются достаточно высокие концентрации NO. Этот факт свидетельствует о наличии иного (отличного от «термического») механизма образования оксидов азота.

В результате ряда исследований доказано, что и во фронте пламени в присутствии большого количества горючих компонентов образуется оксид азота в соответствии со следующим механизмом:



Энергетический барьер реакции очень мал (8,38 кДж/моль). А значит, эти реакции протекают за короткий промежуток времени с большой скоростью даже при температуре 1300 °С, когда образование термических оксидов азота практически не происходит. Поэтому образовавшийся по такому механизму оксид азота был назван «быстрым».

Наиболее характерными признаками быстрого окисления азота являются:

а) кратковременность процесса, в результате чего зона образования NO локализована на сравнительно небольшом участке фронта ламинарного пламени;

б) слабая зависимость выхода NO от температуры горения;

в) сильная зависимость выхода NO от соотношения топливо-воздух.

«Быстрые» оксиды азота образуются непосредственно во фронте ламинарного пламени, на участке, составляющем около 10 % ширины фронта пламени. Причем процесс образования начинается уже у передней границы фронта пламени в области температур около 750 °С.

С точки зрения минимизации выхода NO<sub>x</sub>, перспективным топливом является водород, в пламени которого образуется оксида азота на порядок меньше по сравнению с пламенем метана или оксида углерода.

Согласно расчётным и экспериментальным данным, минимальная концентрация быстрых оксидов азота, образовавшихся во фронте диффузионного пламени природного газа, составляет примерно 75 мг/м<sup>3</sup>, и с этим фактом необходимо считаться при эксплуатации энергетических котлов.

### 8.1.3. Топливные оксиды азота

При образовании *топливных* оксидов азота азот, входящий в состав воздуха, не играет никакой роли. Количество связанного азота, входящего в состав углей, как правило, не превышает 2 %. При сжигании твёрдого топлива связанный азот, входящий в состав высокомолекулярных органических соединений, в результате пиролиза преобразуется в летучие вещества: в бурых углях в основном в NH<sub>3</sub>, а в каменных углях – в HCN. Азот, оставшийся после выхода летучих в коксе, частично переходит в оксид азота (рис. 8.2).

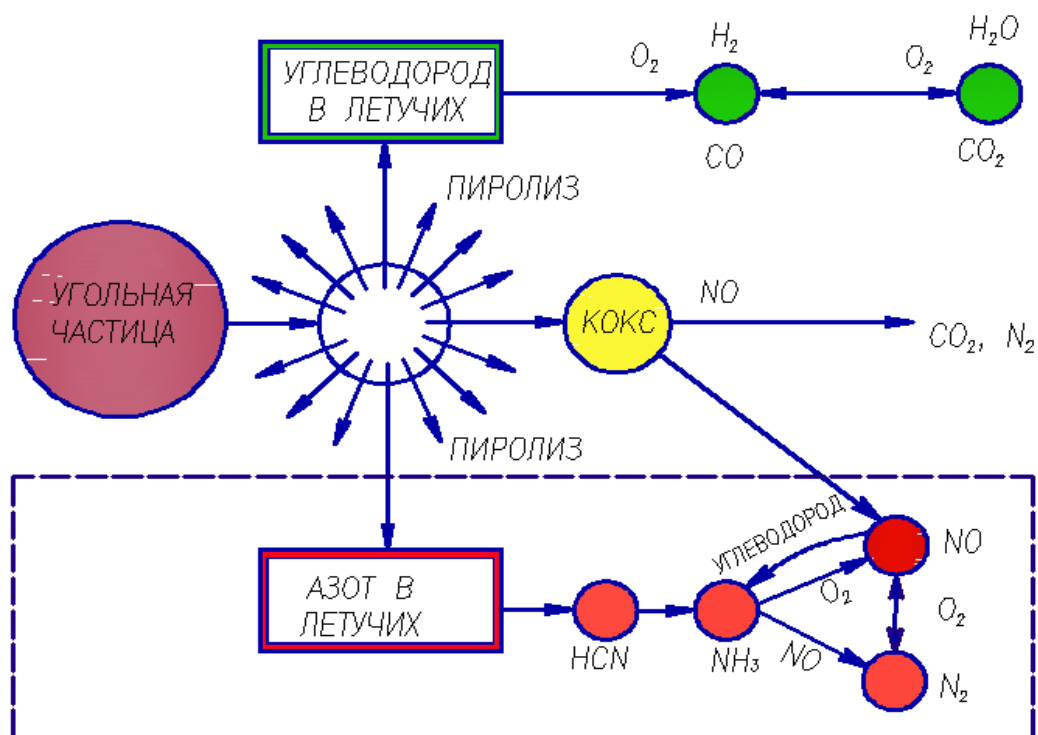


Рис. 8.2. Схема превращения азота при горении угольной пыли

Аммиак  $\text{NH}_3$  переходит в радикалы  $\text{NH}_2$  и  $\text{NH}$ , что в конечном итоге также приводит к образованию  $\text{NO}$  и, частично, молекулярного азота  $\text{N}_2$ . Цианистый водород  $\text{HCN}$  в результате дальнейшего окисления образует оксид азота  $\text{NO}$ , который может окислиться до диоксида  $\text{NO}_2$ . Параллельно может протекать реакция образования молекулярного азота  $\text{N}_2$ .

Цианистый водород  $\text{HCN}$  и радикалы  $\text{NH}_i$  в результате гомогенных реакций могут восстанавливаться до молекулярного азота. Для протекания этих реакций необходима, однако, восстановительная атмосфера, т.е. недостаток кислорода.

Оставшиеся после пиролиза частицы кокса также могут реагировать с образовавшимся ранее оксидом азота. Благодаря протеканию этой гетерогенной реакции  $\text{NO}$  будет восстанавливаться до молекулярного азота, поскольку в противном случае произойдет мгновенное окисление монооксида до диоксида.

Все вышеуказанные реакции протекают в комплексе, т.е. последовательно и параллельно, подчиняясь механизму разветвлённых цепных реакций. Например, только для описания процесса образования монооксида азота из цианистого водорода потребуется 35 реакций.

В ряде многочисленных исследований были выявлены наиболее важные факторы, влияющие на концентрацию топливных оксидов азота:

- содержание азота в органической массе топлива;
- механизм разложения азотсодержащих компонентов твердого топлива;
- степень газификации азота топлива;
- вид азотсодержащих присадок (при сжигании жидкого топлива);
- соотношение первичного и вторичного воздуха;
- температура в факеле;
- выход летучих веществ и скорость их выхода.

Результаты исследований свидетельствуют о линейной зависимости между содержанием азота в топливе и концентрацией образовавшихся оксидов азота. Так, например, трёхкратное увеличение содержания азота в горючей массе угля  $N^{daf}$  с 0,8 до 2,4 % приводит к трёхкратному повышению выхода топливных оксидов азота с 300 до 900 ppm (ppm – parts per million – одна миллионная часть, или  $см^3/м^3$ ).

Содержание минеральных примесей и фракционный состав пыли при прочих равных условиях практически не оказывают влияния на образование оксидов азота.

## **8.2. Способы снижения концентрации оксидов азота**

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

- *пассивный подход* – очистка дымовых газов в специальных установках, смонтированных за котлом на участке между последней тепловоспринимающей поверхностью и дымовой трубой;

- *активный способ* – подавление процесса образования  $\text{NO}_x$  на начальном этапе их формирования.

Сравнительная оценка эффективности и экономичности двух подходов к решению данной проблемы однозначно указывает на целесообразность выбора активного способа снижения  $\text{NO}_x$ . 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  $\text{NO}_x$ , являются *температура* и *содержание кислорода* на начальном участке формирования факела, т. е. в окологорелочной области.

Изучение механизма образования  $\text{NO}_x$  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  $\text{NO}_x$ , 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 ÷ 1750 °С, снижение температуры в ядре горения также имеет важное значение, хотя не является столь же эффективной мерой снижения выбросов NO<sub>x</sub>.

В настоящее время разработано большое количество технических решений, обеспечивающих снижение концентрации оксидов азота. Основные методы представлены на схеме (рис. 8.3).

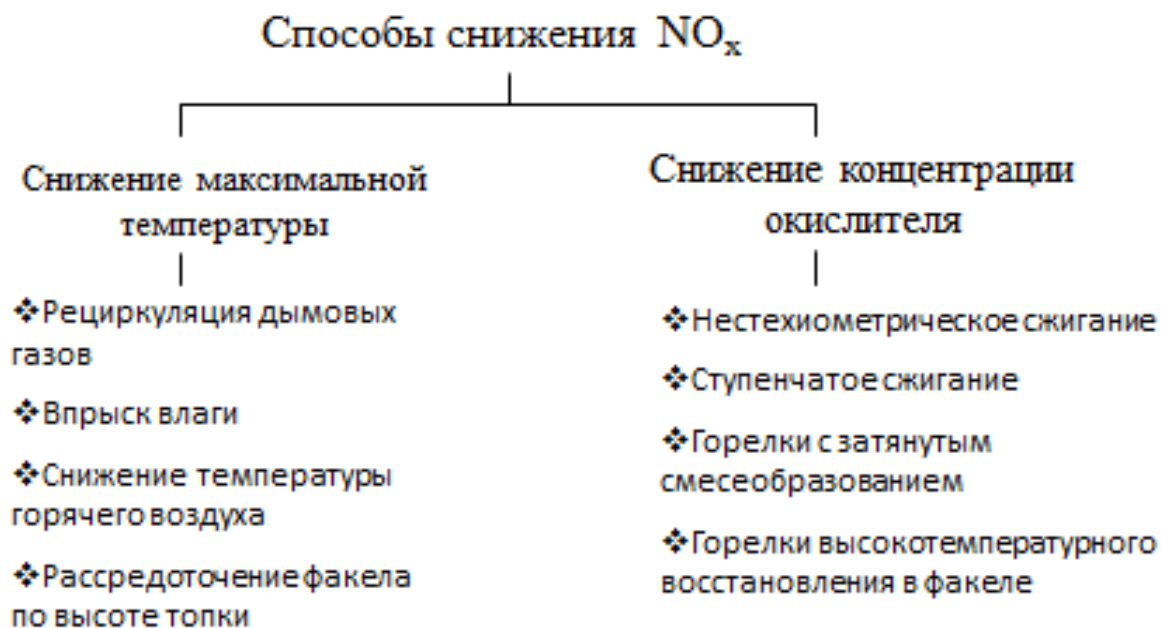


Рис. 8.3. Способы снижения концентрации оксидов азота

При сжигании твёрдого топлива из трёх перечисленных механизмов образования оксидов азота лишь два имеют значение: *термические* и *топливные* (рис. 8.4).

Поскольку скорость образования термических оксидов азота существенна лишь при температурах в зоне активного горения выше 1200 °С, термические оксиды азота играют заметную роль в топках с жидким шлакоудалением, но не в топках с твёрдым шлакоудалением, при условии, что там не наблюдаются высокие локальные температуры. Топливные же оксиды азота существенны в обоих случаях.



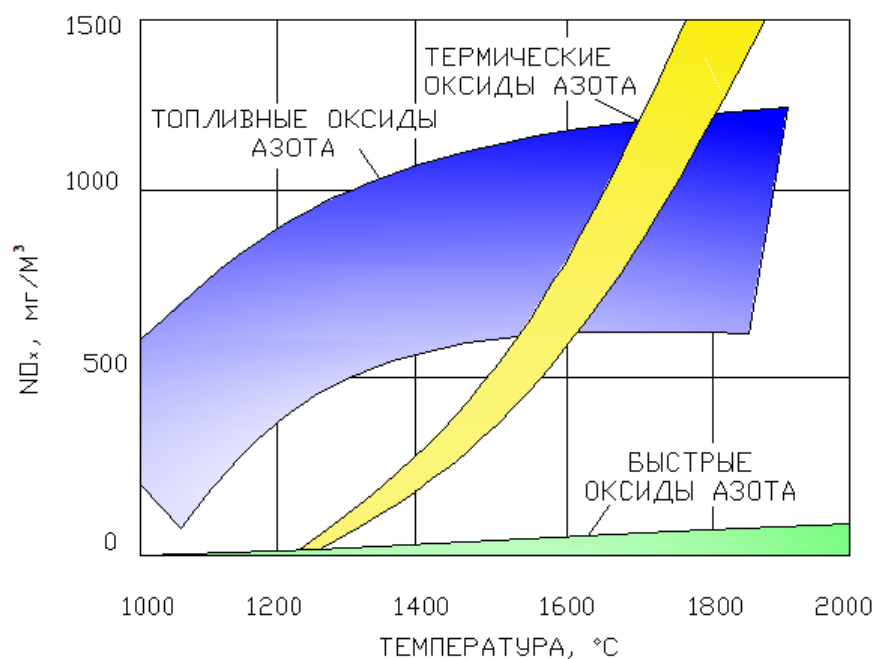


Рис. 8.4. Зависимость концентрации оксида азота от температуры

Таким образом, для снижения концентрации оксидов азота при сжигании органических топлив в топках котельных агрегатов, особенно при факельном сжигании угольной пыли, необходимы следующие предпосылки:

- снижение температуры в топочном объеме, как средней так и локальной, например, в околоторелочной области;
- создание на выходе из горелки реакционных мини-зон с восстановительной атмосферой (недостатком кислорода) для подавления скорости образования топливных оксидов азота.

Оба условия должны быть соблюдены как в околоторелочной области, так и во всем топочном объеме в целом.

Для снижения эмиссии оксидов азота в пылеугольных котлах рекомендуется установка соответствующих горелок и оптимизация топочного объема с точки зрения распределения температурного поля и создания соответствующей атмосферы.

### 8.2.1. Способы, основанные на снижении температуры

*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 щели между горелками, в канал вторичного воздуха, под горелки и пр.) определяется избирательно в каждом конкретном случае (рис. 8.5).

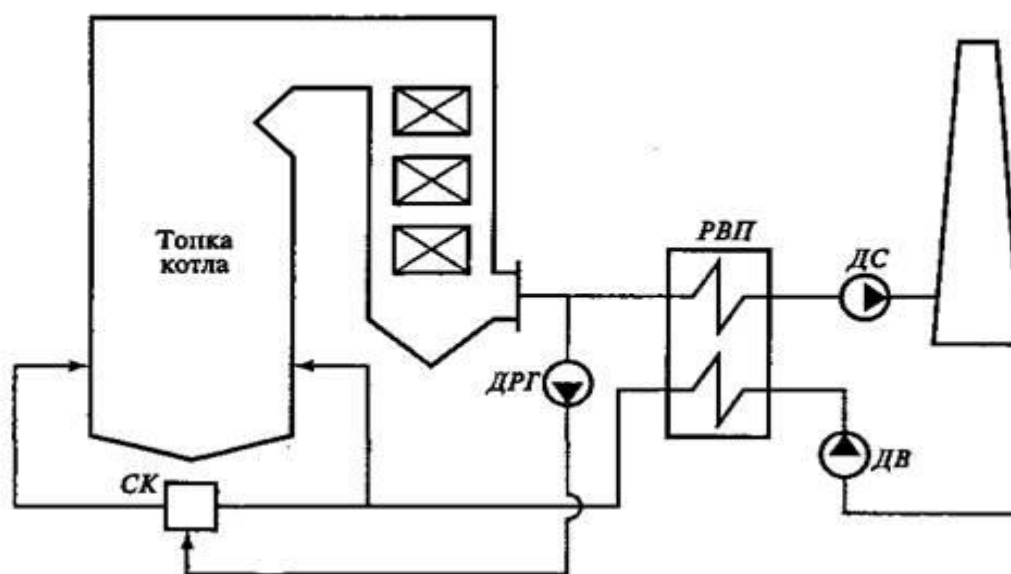


Рис. 8.5. Схема рециркуляции дымовых газов:

ДРГ – дымосос рециркуляции газов; ДВ – дутьевой вентилятор; ДС – дымосос;  
РВП – рекуперативный воздухоподогреватель; СК – смесительная камера

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. Для эффективного сжигания твердого топлива, особенно малореакционных углей, необходимы высокие температуры в топочной камере, что затрудняет применение таких способов снижения  $\text{NO}_x$ .

Для подробной оценки способов снижения образования оксидов азота можно разделить все пылеугольные котлы на три категории по условиям организации топочного процесса (рис. 8.6).

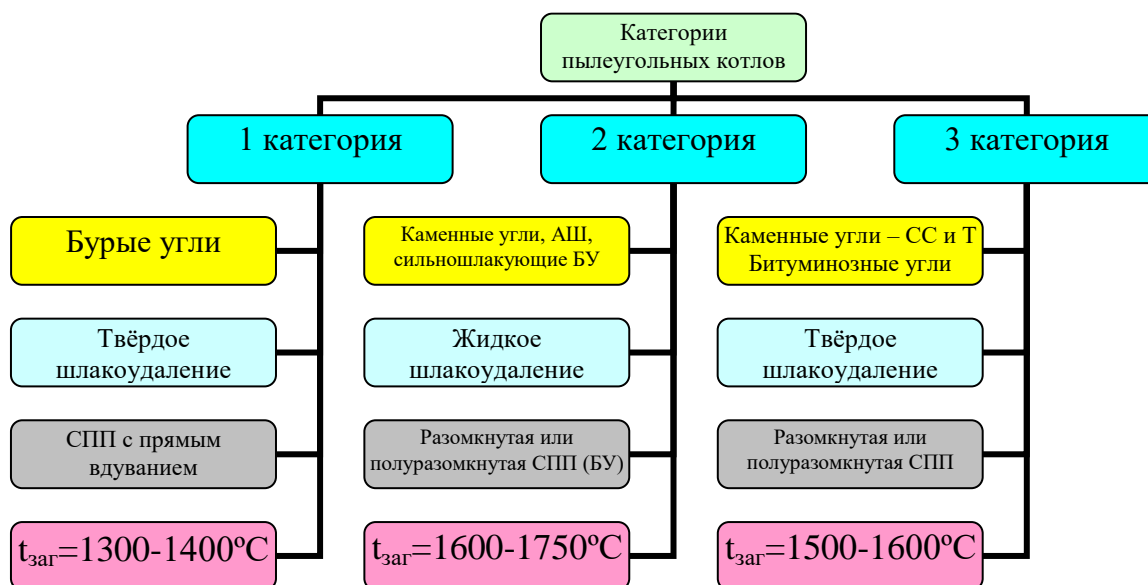


Рис. 8.6. Классификация пылеугольных котлов

### Котлы категории 1

- оборудованы топками с твёрдым шлакоудалением и системой пылеприготовления с прямым вдуванием;
- предназначены для сжигания высоковлажных бурых углей (канско-ачинские, дальневосточные);
- максимальная температура не превышает 1400 °С.

Термические оксиды азота в таких котлах практически отсутствуют. Поэтому снижение максимума температур в топке практически не изменит концентрацию  $\text{NO}_x$  в дымовых газах. Кроме того, снижение максимума температур посредством *впрыска влаги* или *снижения температуры*

*подогрева воздуха* ухудшит стабильность воспламенения и эффективность сгорания угольной пыли.

*Рециркуляция дымовых газов* в канал вторичного воздуха или через специальные сопла на периферии амбразуры горелки также не оказывает существенного влияния на скорость образования оксидов азота.

#### Эффективный способ снижения NO<sub>x</sub>:

*Использование дымовых газов для сушки топлива* при одновременном сокращении доли первичного воздуха. В результате уменьшится концентрация кислорода на начальном участке формирования факела, что приведёт к снижению концентрации NO<sub>x</sub>.

#### Котлы категории 2

- оборудованы топками с жидким шлакоудалением и разомкнутой или полуразомкнутой системой пылеприготовления;
- предназначены для сжигания высококачественных каменных углей (Кузбасс), антрацитового штыба и сильношлакующих бурых углей;
- максимальная температура достигает 1600-1750 °С.

Снижение пика температур приведёт к значительному сокращению выбросов NO<sub>x</sub>, однако для надёжного удаления шлака с пода топочной камеры необходима достаточно высокая температура.

#### Эффективный способ снижения NO<sub>x</sub>

*Рециркуляция дымовых газов* (предпочтительно в верхнюю часть топки) при условии, что снижение нагрузки будет сопровождаться уменьшением степени рециркуляции газов вплоть до полного прекращения.

#### Котлы категории 3

- оборудованы топками с твёрдым шлакоудалением;
- для сжигания каменных (типа СС или Т) и битуминозных (п/б) углей;
- температура в ядре факела до 1600 °С;

#### Факторы, влияющие на образование NO<sub>x</sub>:

- температура в зоне активного горения;

- тепловое напряжение топочного объёма  $q_v$ , МВт/м<sup>3</sup>;
- тепловое напряжение в зоне расположения горелок  $q_{з.г.}$ , МВт/м<sup>2</sup>.

#### Эффективные способы снижения NO<sub>x</sub>:

- *снижение коэффициента избытка воздуха;*
- *нестехиометрическое сжигание;*
- *ступенчатое сжигание;*
- *специальные конструкции горелок;*
- *установка двусветных экранов.*

### **8.2.2. Способы, основанные на снижении избытка воздуха**

Простейшим способом 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  $\alpha_t$ , которое зависит от вида топлива, способа сжигания, конструкции топки и горелки, образуются продукты химического недожога, а иногда и канцерогенного бенз(а)пирена C<sub>20</sub>H<sub>12</sub>.

Современным крупным 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. 8.7).

Нестехиометрическое сжигание организуется за счет *топливно-воздушного разбаланса* по горелкам или ярусам горелок: прикрытия индивидуальных воздушных шиберов (*воздушный разбаланс* – рис. 8.7а) или топливных клапанов (*топливный разбаланс* – рис. 8.7б) 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. 8.7в).

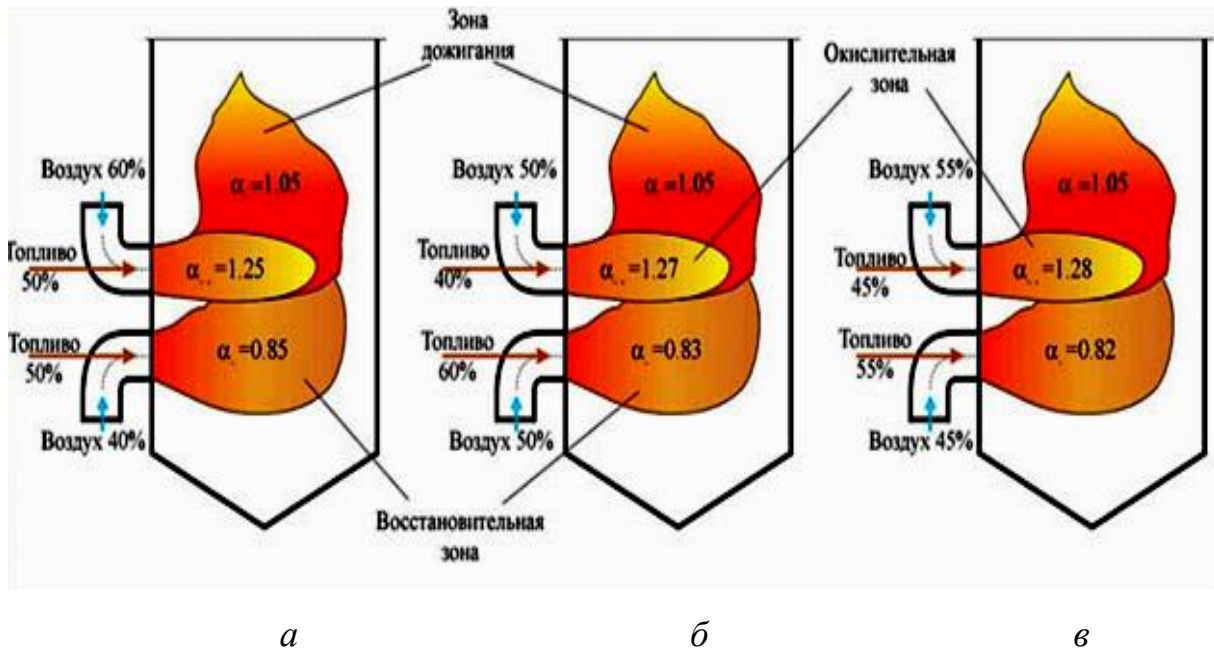


Рис. 8.7. Нестехиометрическое сжигание:

а — воздушный разбаланс; б — топливный разбаланс;  
в — комбинированный разбаланс

Разновидностью нестехиометрического сжигания является метод *ступенчатого сжигания* (рис. 8.8), когда через основные горелки подается только часть воздуха, а остальной необходимый для полного сгорания топлива воздух подается далее по высоте факела через специальные сопла.

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.

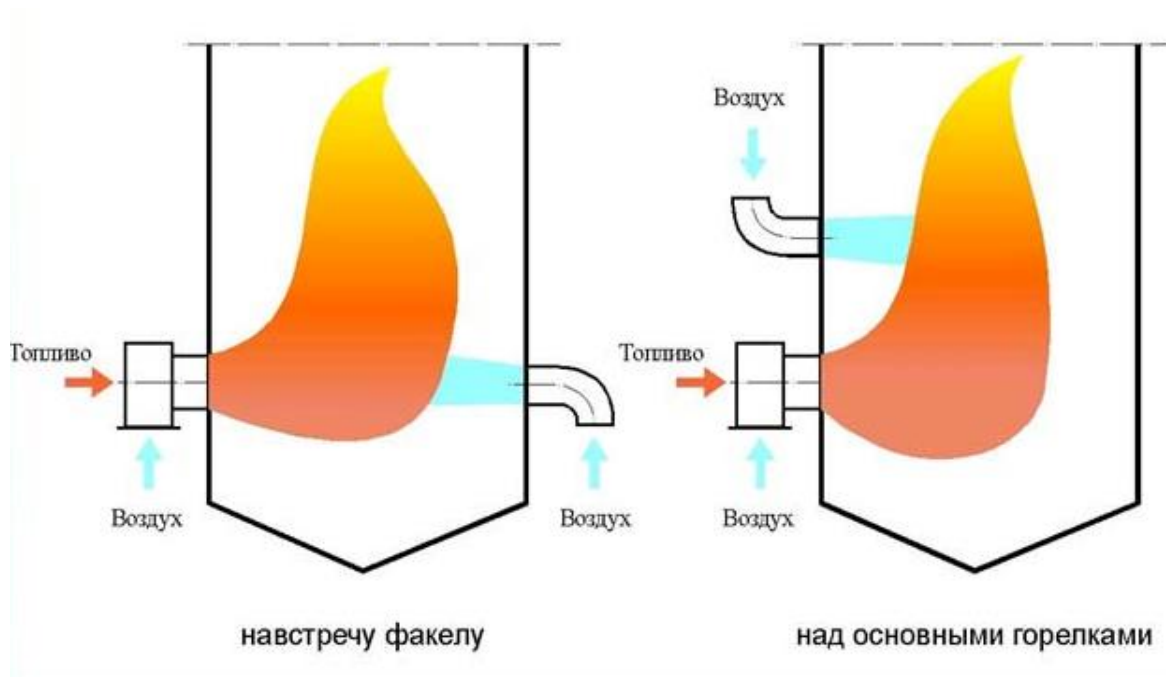


Рис. 8.8. Схемы двухступенчатого сжигания топлива

Такой ступенчатый подвод окислителя приводит к значительному снижению эмиссии  $\text{NO}_x$ . 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 *трехступенчатое сжигание* (рис. 8.9):

1 степень – 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.

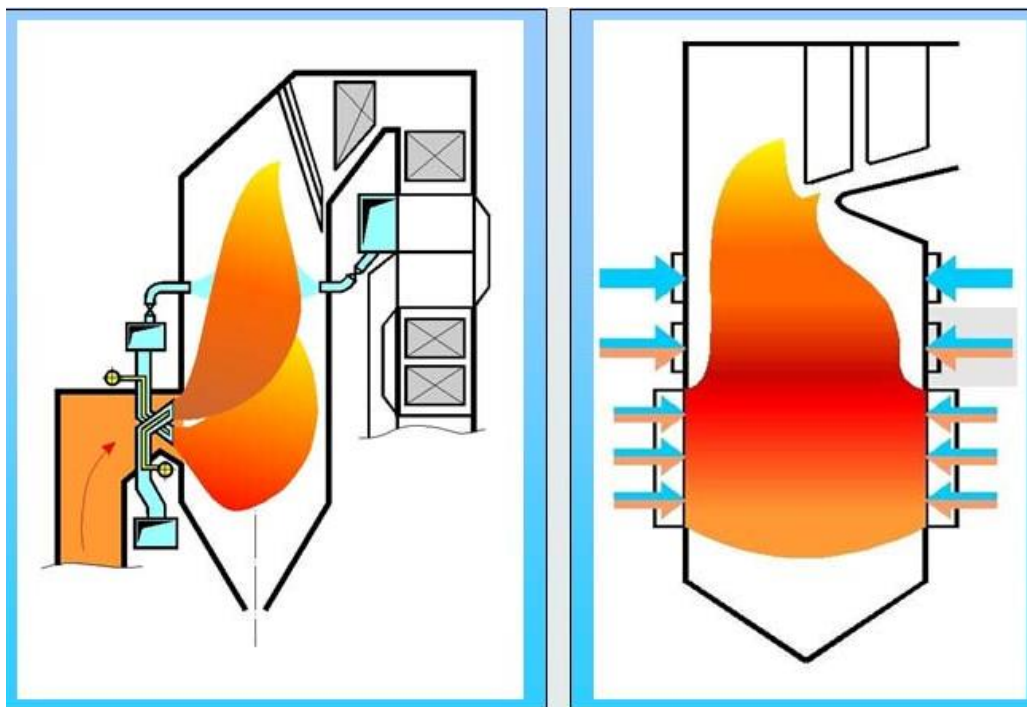


Рис. 8.9. Трехступенчатое сжигание топлива

### 8.3. Специальные конструкции горелок

Одним из перспективных направлений в области снижения эмиссии оксидов азота по праву считается применение специальных конструкций горелок, обеспечивающих торможение процесса образования  $\text{NO}_x$ .

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 струей 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.

### 8.3.1. Горелка с затянутым смесеобразованием

Горелка, обеспечивающая снижение оксидов азота (рис. 8.10), разработана на кафедре промышленной теплоэнергетики ЛТИ ЦБП (СПбГТУРП, ныне ВШТЭ СПбГУПТД) научной группой под руководством профессора Р.С. Тюльпанова и внедрена в 1986 г. на Котласском ЦБК.

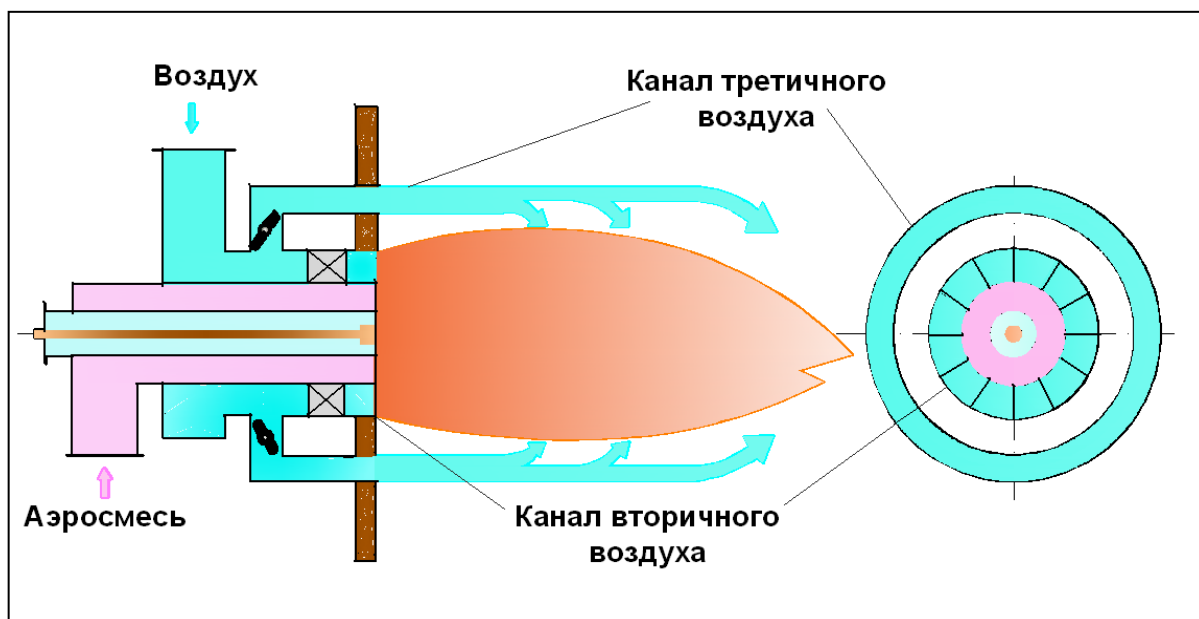


Рис. 8.10. Горелка с затянутым смесеобразованием

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, причем 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 подается по третичному кольцевому каналу, несколько отдаленному к периферии от оси горелки, окружает «богатую» смесь, обеспечивая полное догорание топлива.

Подобная горелка, в которой реализовано два принципа подавления оксидов азота: замедленное смесеобразование и ступенчатый подвод окислителя, – позволяет снизить концентрацию оксидов азота на 40 %.

### **8.3.2. Горелка высокотемпературного восстановления (ВТВ) оксидов азота в факеле**

Горелка ВТВ  $\text{NO}_x$  (рис. 8.11) принадлежит к так называемому второму поколению горелок, снижающих концентрацию  $\text{NO}_x$ . Основная отличительная черта этих горелок от первого поколения заключается в организации химического восстановления  $\text{NO}_x$  в факеле. Ее можно назвать *горелкой с внутрифакельным восстановлением  $\text{NO}_x$* .

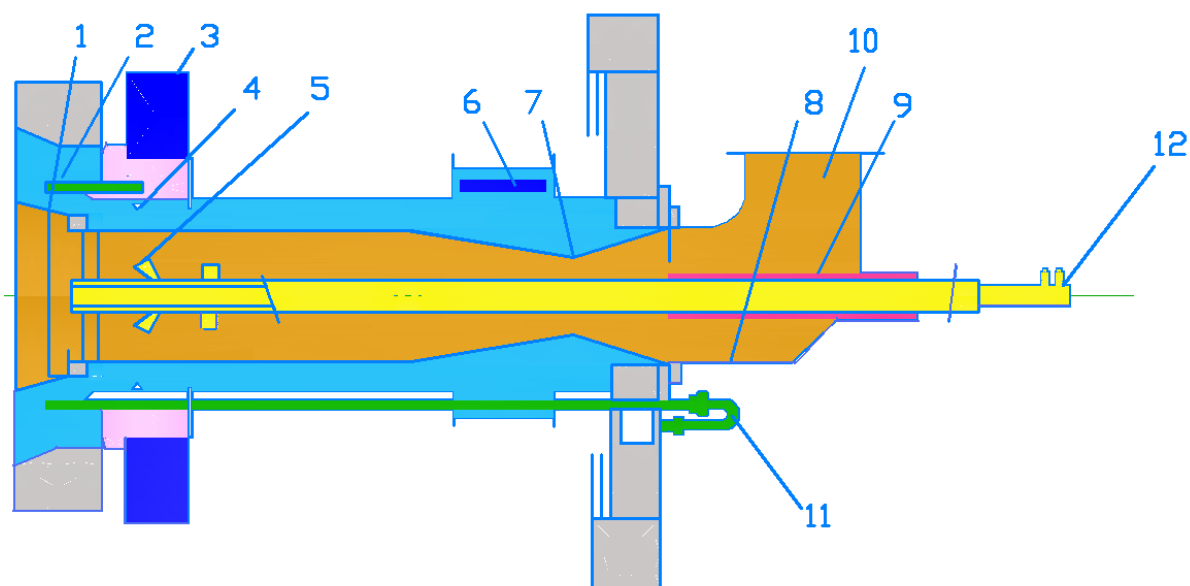


Рис. 8.11. Горелка высокотемпературного восстановления  $\text{NO}_x$  в факеле:

1 – стабилизирующее кольцо; 2 – конус третичного воздуха; 3 – регистр третичного воздуха; 4 – направляющие лопатки вторичного воздуха; 5 – завихритель; 6 – подвод вторичного воздуха; 7 – трубка Вентури; 8 – плоские защитные пластины; 9 – защитный кожух; 10 – подвод пылеугольной смеси; 11 – газовый коллектор; 12 – запальник

### Принцип работы

Цель развития второго поколения горелок заключается в восстановлении  $\text{NO}_x$  в факеле в зоне «А» (рис. 8.12) непосредственно на выходе из горелки, где преобладают высокие температуры, которые способствуют быстрому выделению летучих веществ и начальному горению. В зоне «Б», которая характеризуется пониженным содержанием кислорода, образуются продукты восстановления. Эти продукты образуют зону «В», в которой почти все оксиды азота, образовавшиеся в зоне «А», восстанавливаются до молекулярного азота. После смешения с внешним (третичным) воздухом в зоне «Г» процесс горения (в основном кокса) завершается при сравнительно низких температурах.

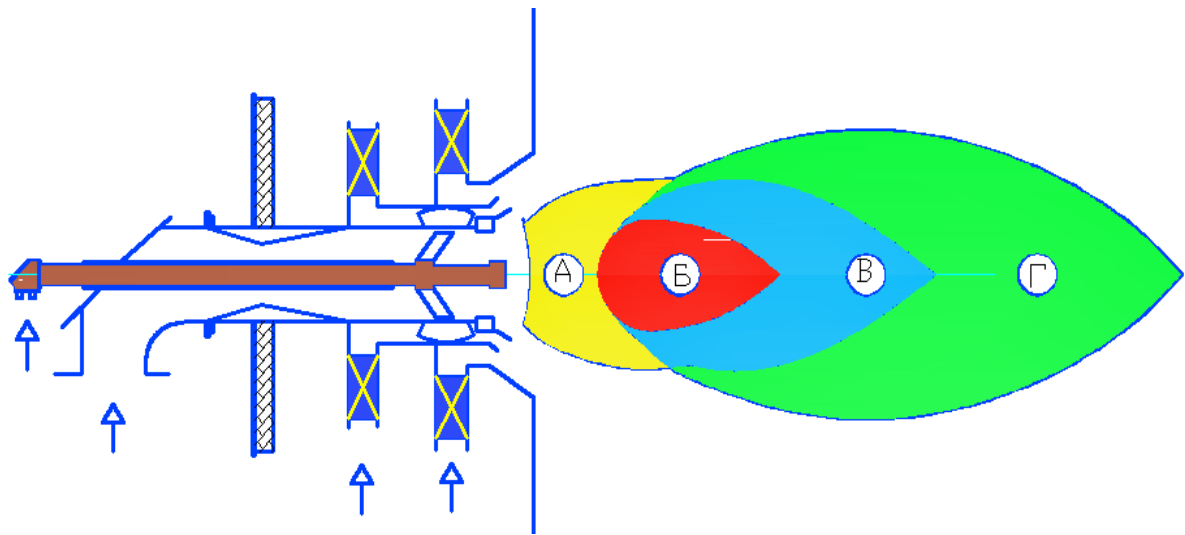


Рис. 8.12. Схема факела в горелке ВТВ  $\text{NO}_x$

Такие горелки позволяют снизить выбросы  $\text{NO}_x$  на  $40\div 50\%$  по сравнению с горелками первого поколения при том же уровне механического недожога.

На восстановление оксидов азота в факеле оказывает большое влияние степень обогащения топливовоздушной смеси.

Исследования показали, что изменение коэффициента первичного воздуха при сохранении постоянным коэффициента избытка воздуха в горелке является мощным фактором воздействия на образование оксидов азота. Во-первых, снижение количества первичного воздуха ускоряет прогрев и воспламенение аэросмеси. В результате этого превращения азотсодержащих соединений топлива происходят раньше, чем вторичный воздух успевает подмешиваться к аэросмеси, т.е. при низких избытках воздуха. Во-вторых, снижение стехиометрического соотношения в подаваемой аэросмеси приводит к быстрому уменьшению концентрации кислорода при выгорании летучих.

На рис. 8.13 представлено качественное изменение концентрации оксидов азота на выходе из горелки, соответственно, первого (горелка с затянутым смесеобразованием) и второго (горелка с восстановлением оксидов азота в высокотемпературном факеле) поколения.

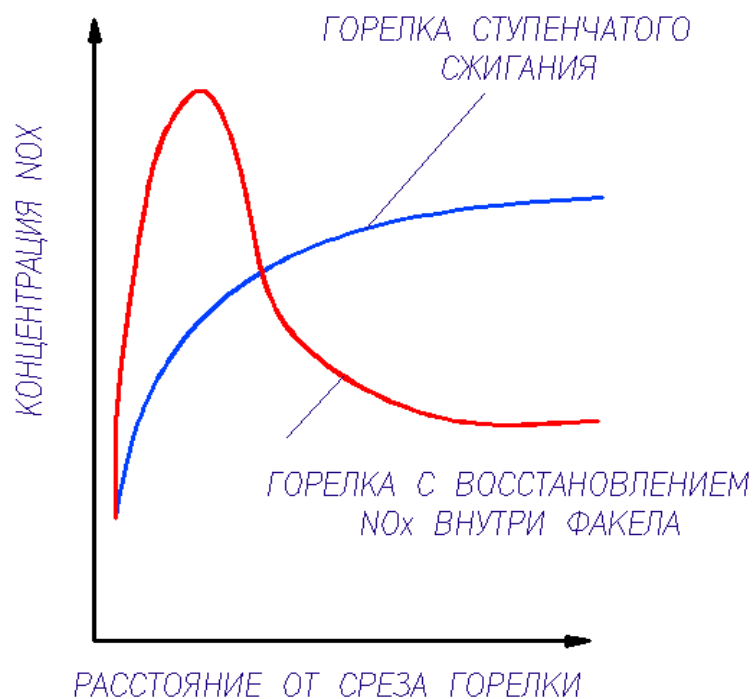


Рис. 8.13. Изменение концентрации оксидов азота  
вдоль оси горелки

Для обеспечения бесперебойного процесса пиролиза в восстановительной зоне должна быть обеспечена достаточная тонкость помола топлива, т.е. увеличена относительная поверхность угольных частиц. Следует заметить, что ограниченное время пребывания требует соответствующего распределения частиц по гранулометрическому составу и определённого значения максимального размера частиц. Например, для каменного угля типичным требованием по тонкости помола является остаток на сите R<sub>90</sub> не более 20 %, так что 80 % топлива должны иметь размер частиц менее 90 мкм.

Реализация всех вышеперечисленных аспектов позволяет снизить эмиссию NO<sub>x</sub> до концентраций, предписанных постулатами Киотского протокола.

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

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.

#### 8.4. Очистка дымовых газов

Все методы очистки дымовых газов от оксидов азота – процессы денитрификации, как и процессы десульфуризации (очистка от оксидов серы) – можно разделить на *сухие* и *мокрые*.

Особенностью первых является то, что в большинстве случаев они предназначены для избирательной очистки газов только от NO<sub>x</sub> с образованием конечного экологически чистого – молекулярного азота.

*Мокрые* (жидкофазные) методы можно разделить на процессы *без регенерации абсорбента* (одноразовое использование) и процессы *с регенерацией абсорбента* (т. е. когда абсорбент циркулирует по замкнутому контуру). Последние методы используются, как правило, для одновременной очистки дымовых газов от SO<sub>2</sub> и NO<sub>x</sub>. Конечными продуктами таких методов совместно с молекулярным азотом являются соединения, используемые в качестве удобрений. Реализация этих продуктов может в значительной степени компенсировать затраты на строительство и эксплуатацию установок очистки дымовых газов.

Большинство процессов *сухой* очистки основано на использовании реакций гетерогенного каталитического или термического разложения, которые протекают при температуре 300...1000 °С. Для печей и паровых котлов очистка дымовых газов с их помощью обычно проводится до подачи газов в воздухонагреватели. *Жидкофазная* очистка дымовых газов, как правило, проводится непосредственно перед выбросом газов в дымовую трубу.

К основным методам удаления  $\text{NO}_x$  с помощью сухой очистки относятся:

- селективное каталитическое восстановление аммиаком (СКВ);
- селективное высокотемпературное (некаталитическое)

восстановление аммиаком;

- неселективное каталитическое восстановление;
- адсорбция.

В основе методов удаления  $\text{NO}_x$ , а также  $\text{NO}_x$  и  $\text{SO}_2$  с помощью мокрой очистки, лежат следующие процессы:

- окисление-абсорбция;
- абсорбция-окисление;
- абсорбция-восстановление, а также сочетание первого с последним.

Различными фирмами ведущих в этой области стран – Германии, Японии, США – создано более 50 разновидностей процессов сухой и мокрой очистки дымовых газов. Наибольшее число фирменных разработок приходится на долю процессов сухой очистки, особенно селективного восстановления с помощью аммиака.

Общий недостаток, характерный для всех технологий, основанных на методах сухой очистки дымовых газов, заключается в том, что на всех стадиях технологической цепочки приходится иметь дело с большими объемами очищаемого газа (1 млн.  $\text{м}^3/\text{ч}$  газа и более). Следствием этого являются крупногабаритные аппараты, требующие больших капитальных вложений. При использовании жидкофазных методов очистки аппараты больших объемов необходимы только на стадии промывки газа; на последующих стадиях, связанных с утилизацией извлекаемых из дымовых газов продуктов, – аппараты относительно небольших объемов.

### 8.4.1. Каталитическое восстановление оксидов азота

Каталитические методы обезвреживания газов позволяют эффективно проводить очистку газов от оксидов азота. Общую схему каталитических методов восстановления можно представить в следующем виде:



Каталитические методы дают возможность:

- перерабатывать многокомпонентные газы с малыми концентрациями вредных примесей;
- добиваться высоких степеней очистки;
- вести процесс непрерывно;
- избегать в большинстве случаев образования вторичных загрязнителей;
- переводить экологически опасные примеси в безвредные или даже в полезные.

Недостатки каталитических методов связаны чаще всего с проблемами поиска, приготовления дешевых катализаторов и обеспечения их длительной эксплуатации.

Основным элементом технологической схемы гетерогенно-каталитического процесса является реактор, загруженный твердым катализатором в виде пористых гранул, колец, шариков или блоков со структурой, близкой к сотовой. Химические превращения происходят на развитой поверхности катализатора, достигающей до 1000 м<sup>2</sup>/г.

К числу эффективных катализаторов, нашедших практическое применение, относятся самые различные вещества – от минералов, которые используются почти без всякой предварительной обработки, и простых металлов до сложных соединений заданного состава и строения. Обычно каталитическую активность проявляют вещества с ионной связью, обладающие сильными межатомными полями. Одно из основных требований, предъявляемых к катализатору, – устойчивость его структуры



и свойств в условиях реакции. Например, металлы не должны в процессе реакции превращаться в неактивные соединения.

Наибольшее распространение получили каталитические методы обезвреживания отходящих газов в неподвижном слое катализатора. В связи с этим можно выделить два принципиально различных метода осуществления процесса газоочистки: *стационарный* и искусственно создаваемый *нестационарный*.

Стационарным методом обезвреживания затруднительно переработать газы с переменными нагрузками и изменяющимися концентрациями. Наличие внешнего теплообмена повышает параметрическую чувствительность системы и увеличивает опасность перегревов и спекания катализатора даже при небольшом увеличении концентрации примесей и (или) уменьшении расхода газа. Эффективная работа таких аппаратов возможна только при постоянных концентрациях (расходах) или совершенных системах автоматического управления процессом.

Промышленно освоенные каталитические методы восстановления  $\text{NO}_x$  условно можно разделить на два основных класса:

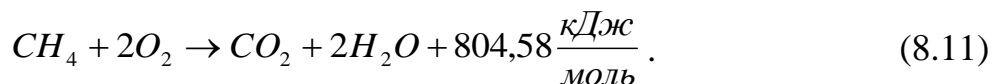
1. высокотемпературное каталитическое восстановление, которое протекает только в бескислородной среде при использовании в качестве восстановителя горючих газов;

2. селективное каталитическое восстановление (СКВ), особенностью которого является взаимодействие используемого восстановителя с оксидами азота в присутствии кислорода.

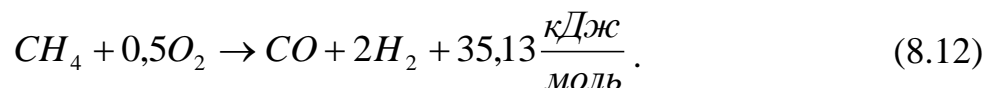
Высокотемпературное каталитическое восстановление осуществляют в присутствии газов восстановителей – водорода, оксида углерода, углеводородов (пары керосина, нефтяной и природный газ). До начала реакции газы должны быть нагреты в зависимости от природы катализатора и восстановителя до 200...480 °С. Нижний предел соответствует восстановлению  $\text{NO}_x$  водородом при использовании в качестве катализатора платины на носителе. Температура 480 °С

необходима при восстановлении природным газом. Оксиды азота восстанавливаются до  $N_2$ . Другими продуктами реакции могут быть вода и диоксид углерода.

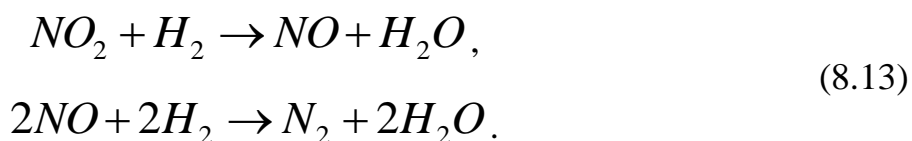
Процесс восстановления оксидов азота горючими газами требует первоначального «выжигания» кислорода, что сопровождается повышением температуры. В случае применения природного газа (метана) «выжигание» кислорода протекает по реакции:



При недостатке кислорода из метана могут образоваться водород и оксид углерода:



Все три восстановителя ( $CH_4$ ,  $CO$  и  $H_2$ ) реагируют на катализаторе с оксидами азота, восстанавливая их до элементарного азота:



Аналогично реагируют  $CH_4$  и  $CO$ .

В отходящих газах ТЭС концентрация кислорода составляет 3...8 %. Для поддержания восстановительной среды отношение  $CH_4/NO_x$  поддерживают на уровне 0,55...0,56. Большой избыток метана приводит к появлению в газе после очистки токсичного оксида углерода.

В реальных условиях в отходящих газах после восстановления оксидов азота содержание  $CO$  составляет 0,22...0,4 % по объему.

В качестве катализаторов высокотемпературного восстановления используют различные металлы, чаще всего нанесенные на разнообразные носители. Основными активными компонентами служат платина, палладий, родий, никель, медь, хром, а также ряд сплавов. Форма носителей также разнообразна. Это как таблетированные, так и формованные катализаторы.

Наибольшее распространение получили палладиевые катализаторы марки АПК-2, представляющие собой таблетированный оксид алюминия, на который нанесен Pd в количестве 2 % по массе. В качестве восстановителя используется природный газ. Температура газа на входе в реактор составляет 400...500 °С, на выходе 700...750 °С. Остаточное содержание оксидов азота не более 0,005 % по объему.

В настоящее время разработан катализатор АЖМ-15 (на замену АПК-2), который представляет собой нанесенные на  $Al_2O_3$  оксиды железа, марганца и меди. Процесс высокотемпературного каталитического восстановления оксидов азота применяется в основном на линиях по производству слабой азотной кислоты.

## 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., Сергеев В.В. Топливо и теория горения: учебное пособие. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. - 231 с.
- Белоусов В.Н., Смородин С.Н., Смирнова О.С. Основы сжигания газа: учебное пособие / СПбГТУРП.- СПб., 2009.
- Белоусов В.Н., Смородин С.Н., Смирнова О.С. Топливо и теория горения. Ч.II. Теория горения: учебное пособие / СПбГТУРП. – СПб., 2011.
- Вулис П.А., Ярин Л.П. Аэродинамика факела.- Л.: Энергия, 1978.
- 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.
- 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.
- 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.: Энергоатомиздат, 1988.

Сморозин С.Н., Иванов А.Н., Белоусов В.Н. Котельные установки и парогенераторы: учебное пособие / ВШТЭ СПбГУПТД, - СПб., 2018.

Сморозин С.Н., Иванов А.Н., Белоусов В.Н., Лакомкин В.Ю. Тепловой и аэродинамический расчеты котельных установок: учебное пособие. – 5-е изд., перераб. и доп./ ВШТЭ СПбГУПТД. – СПб., 2018 .

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.

СО 153-34.02.304-2003. Методические указания по расчету выбросов оксидов азота с дымовыми газами котлов тепловых электростанций. – Москва, 2005. – 28 с.

Belousow W. Experimentelle Untersuchung und mathematische Beschreibung des brennernahen 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.

Forster P., Ramaswamy V. et al.: Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge und New York 2007.

Mathur M.L., MacCalum 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 .....	7
3.1.	Материальный баланс процесса горения твёрдого и жидкого топлива .....	11
3.2.	Материальный баланс процесса горения газа .....	15
3.3.	Действительные объёмы воздуха и продуктов сгорания .....	18
4.	Выбор оптимального значения коэффициента избытка воздуха	20
5.	Тепловой баланс процесса горения .....	27
5.1.	Энтальпия продуктов сгорания .....	35
5.2.	Температура в камере сгорания .....	37
6.	Динамика процесса горения .....	40
6.1.	Основы кинетики процесса горения .....	42
6.1.1.	Скорость реакции горения и её зависимость от концентрации реагирующих веществ .....	43
6.1.2.	Энергия активации. Тепловой эффект реакции .....	49
6.1.3.	Зависимость скорости реакции от температуры. Закон Максвелла-Больцмана. Закон Аррениуса .....	52
6.2.	Диффузия и массообмен при горении углерода .....	57
6.2.1.	Молярный перенос. Стефановский поток .....	65
6.2.2.	Аналогия между тепло- и массообменом .....	65
6.2.3.	Относительное движение частиц в потоке. Скорость витания ...	68
6.3.	Зависимость скорости горения от физических и химических факторов. Кинетическое и диффузионное горение .....	74
7.	Способы сжигания топлива .....	81
7.1.	Слоевое сжигание .....	81
7.2.	Факельное сжигание .....	86
7.2.1.	Расположение горелок на стенках топочной камеры .....	88
7.3.	Сжигание в кипящем слое .....	96
7.4.	Вихревые топки .....	104
7.4.1.	Высокотемпературное вихревое сжигание .....	104
7.4.2.	Низкотемпературное вихревое сжигание .....	105
7.4.3.	Кольцевая топка .....	110
8.	Экология в энергетике .....	114
8.1.	Механизмы образования оксидов азота .....	119
8.1.1.	Термические оксиды азота .....	120
8.1.2.	«Быстрые» оксиды азота .....	122
8.1.3.	Топливные оксиды азота .....	123
8.2.	Способы снижения концентрации оксидов азота .....	125
8.2.1.	Способы, основанные на снижении температуры .....	129
8.2.2.	Способы, основанные на снижении избытка воздуха .....	132
8.3.	Специальные конструкции горелок .....	135
8.3.1.	Горелка с затянутым смесеобразованием .....	136

8.3.2. Горелка высокотемпературного восстановления (ВТВ) оксидов азота в факеле .....	137
8.4. Очистка дымовых газов .....	141
8.4.1. Каталитическое восстановление оксидов азота .....	143
Библиографический список .....	147



*Учебное издание*

**Владимир Николаевич Белоусов**

**Сергей Николаевич Смородин**

**Виктор Дмитриевич Цимбал**

**Топливо и процессы горения  
в теплоэнергетических установках**

**Часть 2**

**Учебное пособие**

Редактор и корректор Н.П.Новикова

Темплан 2020 г., поз. 134

Техн. редактор Л.Я.Титова

---

Подп. к печати 07.12.2020.      Формат 60×84/16.      Бумага тип. № 1.

Печать офсетная. 9,5 печ.л.; 9,5 уч.-изд.л. Тираж 100 экз. Изд. № 134.

Цена «С». Заказ

---

Ризограф Высшей школы технологии и энергетики СПбГУПТД, 198095,  
Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, 4.