

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
«ХАРЬКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»

Р.Г. Акмен

**ТОПЛИВО, ОСНОВЫ ТЕОРИИ ГОРЕНИЯ
И ТОПОЧНЫЕ УСТРОЙСТВА**

Текст лекций
и задачи по отдельным разделам курса
для студентов заочного обучения
специальностей 7.090510 «Теплоэнергетика»
и 7.000008 «Энергетический менеджмент»

Утверждено
редакционно-издательским
советом университета
протокол № 1 от 20.01 2005г

Харьков НТУ «ХПИ» 2005

ББК 31.35
УДК 662.6/.9

Рецензенты: В.В. Соловей, д.т.н., проф.,
ИПМаш им. А.Н. Подгорного НАН Украины,
А.А.Шевелев, к.т.н., проф., НТУ «ХПИ».

Акмен Р.Г. Топливо, основы теории горения и топочные устройства. Текст лекций по курсу «Топливо и топочные устройства» для студентов заочного обучения специальностей 7.090510 «Теплоэнергетика» и 7.000008 «Энергетический менеджмент»: – Харьков: НТУ «ХПИ», 2005.– 68с. – На русск. яз.

Учебно-методическое пособие содержит полный курс лекций по статике и динамике горения органических топлив, а также классификацию и конструкции основных топливосжигающих устройств. Приведены примеры решения типовых задач по горению органических топлив.

Предназначено для студентов специальностей «Теплоэнергетика» и «Энергетический менеджмент».

Учбово-методичний посібник вміщує повний курс лекцій по статистиці та динаміці горіння органічних палив, а також класифікацію та конструкції основних паливних пристроїв. Наведені приклади розв'язання типових задач по горінню органічних палив.

Призначено для студентів фахів “Теплоенергетика” та “Енергетичний менеджмент”.

Рис. 17. Табл. 4. Библиогр. 5 назв.

© Р.Г. Акмен

ВВЕДЕНИЕ

Горение является первым техническим процессом, освоенным человеком. В технике этот процесс занимает одно из ведущих мест, являясь основой энергетики, транспорта, большинства технологических процессов и быта. По потреблению энергии можно судить об уровне развития страны. Основным поставщиком энергии является топливо.

Топливом называют вещества, выделяющие в результате тех или иных превращений энергию, которая может быть технически использована. В настоящее время человечество располагает двумя типами топлива: ядерным и химическим. Первое выделяет энергию при ядерном распаде (синтезе, что еще не освоено); второе – в результате химических реакций окисления. Окисление, протекающее с высокой скоростью, и называют горением.

К топливу предъявляется ряд требований:

- запасы топлива должны быть достаточны для экономически выгодной его добычи;
- продукты реакции должны легко удаляться из зоны реагирования;
- продукты реакции должны быть безвредны для окружающей среды и устройств, где происходит реагирование;
- процесс реакции должен быть легко управляемым.

Наилучшим образом в настоящее время этим требованиям удовлетворяет химическое топливо, в основе которого лежат органические соединения, содержащие С, Н, О и их соединения. В природе химическое топливо включает в себя: древесину, торф, уголь, горючие сланцы, нефть и природный газ.

Горение является достаточно сложным и до конца еще не изученным процессом. Поэтому, как правило, возникает необходимость длительной и кропотливой опытной доводки тех агрегатов и устройств, где источником тепла является горение топлива. Это объясняется следующими причинами. Во-первых, главный участник процесса – топливо – является сложным комплексом природных горючих веществ органического происхождения со сложным химическим составом. При нагреве топлива происходит разложение сложных комплексов на более простые соединения. Это обстоятельство затрудняет изучение процесса. Во-вторых, в процессе горения (окисления) происходит контакт горючего и окислителя (кислорода воздуха) – первый, физический этап процесса, и само взаимодействие молекул окислителя и топлива – химический этап. В зависимости от условий сжигания топлива определяющее влияние может оказывать любой из этапов процесса горения. В-третьих, горение в принципе не является равновесным процессом, т.к. обязательно возникают неоднородности, как поля температуры, так и поля концентрации реагирующих веществ и, соответственно, потоки теплоты и массы.

Поэтому задачи теории горения можно характеризовать как задачи нестационарного тепло- и массопереноса при наличии источников теплоты и вещества.

1. КЛАССИФИКАЦИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО ТОПЛИВА

Основным элементом процесса горения является топливо, а его характеристики обуславливают, во многом, как способ сжигания топлива, так и протекание процесса горения. Топливо бывает природным (древесина, торф, каменные угли, сланцы, антрациты – твердые топлива, нефть – жидкое топливо, горючие газы – газообразное) и искусственным, полученным либо в результате переработки природного топлива (кокс для доменных печей; генераторный газ при газификации твердого топлива; бензин, керосин и т.д. при переработке нефти), либо как попутный продукт технологического процесса (коксовый газ, доменный газ).

Особенности природного топлива связаны с его происхождением и геологическим возрастом. Принято считать (это доказано изучением структуры), что вся гамма твердых топлив от торфа до антрацита представляет собою различные стадии геологического старения первичных углеобразователей растительного происхождения от древесных пород до мхов, ила. Растительные организмы состоят из целлюлозы (гемицеллюлозы), белков, лигнинов, восков и смол. Если строение и состав целлюлозы хорошо известен (полимерные углеводороды типа $(C_6H_{10}O_5)_n$), то строение лигнина, воска и смол изучены недостаточно. Известен только их элементарный состав: С – 62÷70%; Н – 4,5÷6,6%; кислород и некоторые другие элементы. В процессе геологического старения целлюлоза и белки легко поддаются разложению и могут удаляться из органической массы. Лигнины, воски и смолы остаются в топливе и превращаются в угли. Со временем к органическим остаткам добавляются неорганические соединения, представляющие собою золу топлива. Переход от торфа к бурым, каменным углям и антрацитам характеризуется повышением содержания углерода и понижением содержания водорода и кислорода в топливе. Из твердых топлив выделяются т.н. сапропелевые угли (встречаются редко), представляющие собою продукт геологического старения ила и планктона. Они характеризуются пониженным содержанием кислорода и повышенным содержанием водорода. Разновидностью сапропелевых углей, имеющую повышенную зольность из-за накопления минеральных примесей, являются горючие сланцы (Эстония).

Таблица 1.1 – Средний состав твердого топлива

Топливо	V ^r %	C ^r %	H ^r %	O ^r %	N ^r %	S ^r %	A ^c %	W ^p %
Торф	~65	~55	6	35	3	1	10	40
Бурый уголь	~50	66	6	25	1	<5	15	30
Каменные угли	~35	80	5	15	1	<3	20	10
Тощий уголь	10	85	4	2	1	<2	20	7
Антрацит	<8	85	3	1	1	<2	20	6
Сланцы	90	~73	6	10	1	10	55	20
Кокс	<5	95	–	–	<1	<2	15	5

Одной из особенностей твердого топлива является выделение газообразных летучих компонентов при нагревании (V). После выделения

летучих остается твердый остаток (кокс) состоящий из углерода и золы (*A*). Летучие определяют процесс воспламенения топлива, а горение определяется выгоранием углерода кокса. Кроме названных компонентов природное топливо содержит влагу (*W*). Средний состав твердого топлива приведен в табл. 1.1.

Искусственным твердым топливом является кокс, который получают путем нагрева каменных коксующихся углей (марок ПЖ, ПС, К и др.) без доступа воздуха до температуры порядка 1000°C. Происходит выделение летучих, а оставшаяся масса спекается, образуя твердую пористую структуру, которая и называется коксом. Используется кокс как восстановитель и источник теплоты в доменных печах (получение чугуна из руды).

Единственным природным жидким топливом является нефть. Процесс образования нефти из органических остатков до сих пор не ясен. Считается, что нефть образовалась из органических остатков при герметичности (остатки разложения целлюлозы и белков не удаляются), повышенном давлении и температуре. Нефть является ценным продуктом, позволяющим получить искусственные жидкие топлива (бензин, керосин), смазывающие вещества (органические масла). Процессы переработки нефти: крекинг и пиролиз. Крекинг нефти заключается в ее нагреве без доступа воздуха до $\approx 200^\circ\text{C}$. При этом, получают жидкие топлива, а остаток, называемый мазутом, используется как энергетическое и транспортное (корабельное) топливо. Пиролиз является более глубокой переработкой нефти, позволяющей получить не только жидкие топлива, но и масла, и заключается в нагреве нефти до $300 \div 400^\circ\text{C}$ при повышенном давлении без доступа воздуха. Остаток после пиролиза называется асфальт.

Природное газообразное топливо – это сухие природные газы (чисто газовых месторождений, содержат более 80% CH_4 и его гомологи) и жирные газы (попутные газы нефтяных месторождений ($\text{CH}_4 < 60\%$, его гомологи и другие углеводороды). Попутные газы представляют собою ценное химическое сырье для получения искусственного каучука, и не используется как топливо. Сухие газы чаще всего используются как топливо. Состав природного газа существенно зависит от месторождения и колеблется в достаточно широких пределах. Кроме углеводородов природный газ содержит примеси, состоящие в основном из N_2 , CO_2 , изредка (США) He .

Вопросы для самопроверки

- 1. Что называют «топливом», существующие виды топлива.*
- 2. Требования, предъявляемые к топливу.*
- 3. Классификация природного твердого топлива.*
- 4. Искусственное твердое топливо, его получение и назначение.*
- 5. Природное газообразное топливо, классификация.*

1.1. Технические характеристики топлива

Состав топлива является его важной технической характеристикой, исходной для анализа большинства процессов, происходящих с топливом в промышленных установках. Первичные топливообразователи, состоящие из С,

H, O, N, S, составляют **горючую массу** твердого и жидкого топлив, куда относят и органический азот, не принимающий участие в реакциях окисления. Состав горючей массы топлива можно записать в виде

$$C^{\Gamma} + H^{\Gamma} + O^{\Gamma} + N^{\Gamma} + S^{\Gamma} = 100\%,$$

или

$$C^{\Gamma} + H^{\Gamma} + O^{\Gamma} + N^{\Gamma} + S^{\Gamma} = 1, \quad (1.1)$$

где X^{Γ} – процентное или долевое содержание данного компонента в горючей массе. Следует отметить, что сера горючей массы состоит из органической серы, входящей в состав топливообразователей, и колчеданной серы, входящей в FeS_2 . Тогда

$$S^{\Gamma} = S_{ор}^{\Gamma} + S_{кол}^{\Gamma}. \quad (1.2)$$

В процессе геологического старения к первичным топливообразователям добавляются неорганические примеси, составляющие золу топлива. Зольность топлива (A) определяется путем сжигания определенной массы топлива. При этом влага, содержащаяся в топливе, испаряется. **Сухая масса** топлива состоит из топливообразователей и золы. Тогда

$$C^c + H^c + O^c + N^c + S^c + A^c = 100\%,$$

или

$$C^c + H^c + O^c + N^c + S^c + A^c = 1. \quad (1.3)$$

Общая масса топлива, включающая сухую массу и влагу (W), называется **рабочей массой**. Тогда

$$C^p + H^p + O^p + N^p + S^p + A^p + W^p = 100\%,$$

или

$$C^p + H^p + O^p + N^p + S^p + A^p + W^p = 1. \quad (1.4)$$

Элементарный состав горючей массы топлива определяется путем сжигания определенной навески топлива с последующим улавливанием и анализом продуктов сгорания. Поэтому в таблицах твердого топлива приводится состав горючей массы топлива. Пересчет содержания любого компонента горючей массы в рабочую массу производится следующим образом.

Определяется зольность рабочей массы топлива из баланса масс в виде

$$A^p = A^c (100 - W^p) / 100, \text{ или } A^p = A^c (1 - W^p). \quad (1.5)$$

Содержание балласта рабочей массы топлива

$$B^p = A^p + W^p. \quad (1.6)$$

Содержание любого компонента рабочей массы по известному содержанию этого же компонента в горючей массе определяется из баланса массы в виде

$$X^p = X^{\Gamma} (100 - B^p) / 100, \text{ или } X^p = X^{\Gamma} (1 - B^p). \quad (1.7)$$

Состав горючих газов можно также характеризовать соотношениями (1.1) – (1.4). Однако удобнее (и принято) определять состав газообразного топлива по объемному содержанию отдельных его компонентов. Т.е.:

$$CH_4 + \sum C_m H_n + CO + CO_2 + N_2 + H_2 + H_2S = 100\%,$$

или

$$CH_4 + \sum C_m H_n + CO + CO_2 + N_2 + H_2 + H_2S = 1. \quad (1.8)$$

Тепловую ценность топлива характеризует его **теплотворная способность** (Q), которая представляет собою количество теплоты, выделяемое единицей топлива (кг или нм^3) при его полном сгорании (до образования конечных продуктов окисления).

В продуктах сгорания топлива всегда содержится водяной пар, образовавшийся при горении водорода топлива и испарении влаги топлива. Этот пар может покидать агрегат или устройство, где сжигается топливо, в газообразном состоянии или конденсироваться до жидкой фазы, отдавая при этом скрытую теплоту парообразования. Теплотворная способность топлива при конденсации водяного пара называется **высшей теплотворной способностью** и обозначается Q_v^p . Однако, в реальных устройствах, использующих процесс горения топлива, продукты сгорания покидают устройство при достаточно высокой температуре, унося не сконденсировавшийся пар. Теплотворная способность топлива, определенная без конденсации водяного пара, называется **низшей теплотворной способностью** и обозначается Q_n^p .

Обычно теплотворная способность топлива определяется экспериментально, путем сжигания определенной навески топлива в калориметрическом устройстве, и приводится в таблицах топлива. Для приближенных ее расчетов по составу рабочей массы твердого и жидкого топлива можно использовать формулу Менделеева

$$Q_n^p = 81C^p + 246H^p + 26(S^p - O^p) - 6W^p \text{ [ккал/кг]},$$

$$\text{или } Q_n^p = 339C^p + 1030H^p + 109(S^p - O^p) - 25W^p \text{ [кДж/кг]}, \quad (1.9)$$

где компоненты рабочей массы взяты в процентах.

Для сухих природных и искусственных газов с достаточной точностью можно определить низшую теплотворную способность по соотношению

$$\begin{aligned} Q_n^c &= 25,8H_2 + 30,2CO + 85,6CH_4 + 152,3C_2H_6 + 218C_3H_8 + \\ &+ 283C_4H_{10} + 348,9C_5H_{12} + 55,9H_2S \text{ [ккал/нм}^3\text{]}, \\ Q_n^c &= 108H_2 + 126CO + 359CH_4 + 637C_2H_6 + 913C_3H_8 + \\ &+ 1186C_4H_{10} + 1460C_5H_{12} + 234H_2S \text{ [кДж/нм}^3\text{]}, \end{aligned} \quad (1.10)$$

где компоненты топлива взяты в объемных процентах.

Теплотворная способность твердого топлива колеблется в достаточно широких пределах, что объясняется существенным различием состава рабочей массы топлива. Природный газ имеет меньшие отличия в составе, поэтому в среднем теплотворная способность природного газа составляет $\sim 35,5$ МДж/нм³.

Состав искусственного газа существенно зависит от способа его получения. Так в коксовом газе $H_2 \sim 55\%$, $CO \sim 10\%$, $CH_4 \sim 20\%$, а его теплотворная способность ~ 16 МДж/нм³. Относительно малая теплотворная способность коксового (и других искусственных газообразных топлив) объясняется высоким содержанием балласта: CO_2 – в коксовом газе; CO_2 , N_2 – в генераторном и доменном. В генераторном газе $H_2 \sim 15\%$, $CO \sim 30\%$, а его

теплотворная способность $\sim 5,5$ МДж/нм³. Доменный газ содержит до 70% азота, Н₂ $\sim 5\%$, СО $\sim 25\%$, а его теплотворная способность ~ 4 МДж/нм³.

Вопросы для самопроверки

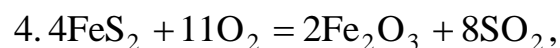
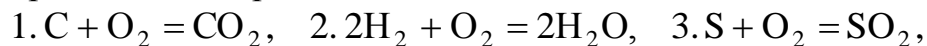
1. Из каких элементов состоит горючая масса твердого (жидкого) топлива?
2. Что такое «сухая» и «рабочая» массы топлива?
3. Как пересчитать «горючую» массу в «рабочую»?
4. Дайте определение теплотворной способности топлива.
5. Чем отличается «высшая» теплотворная способность от «низшей»?
6. Природное и искусственные жидкие топлива, их получение.
7. Искусственное газообразное топливо, его получение, характеристики.

2. СТАТИКА ГОРЕНИЯ

В процессе горения топлива происходит окисление органической массы топлива кислородом воздуха и образование продуктов сгорания. Если не принимать во внимание развитие процесса во времени, т.е. динамику этого процесса, то для статических расчетов достаточно иметь данные по составу топлива и окислителя (воздуха). Тогда, считая, что процесс окисления идет до образования конечных продуктов реакции, можно записать уравнения химических реакций и составить материальный баланс процесса горения. Последний дает возможность определить количество воздуха, необходимое для полного сжигания единицы топлива, а также найти состав продуктов сгорания.

2.1. Материальный баланс процесса горения

Полное окисление горючих компонентов рабочей массы твердого топлива происходит по реакциям:



или в массовых единицах, учитывая молекулярные веса компонентов:

$$1. 12 + 32 = 44; \quad 2. 4 + 32 = 36; \quad 3. 32 + 32 = 64;$$

$$4. 480 + 352 = 320 + 512.$$

На единицу массы горючего компонента количество кислорода и продуктов реакции получается:

$$1. 1 + 8/3 = 11/3; \quad 2. 1 + 8 = 9; \quad 3. 1 + 1 = 2;$$

$$4. 1,875 + 1,375 = 1,25 + 2.$$

Как видно из реакций, на горение органической и колчеданной серы требуется различное количество кислорода. Но, в связи с малым содержанием серы в топливе, этим различием пренебрегают и считают горение всей серы, как органической.

Если состав рабочей массы твердого или жидкого топлива задан в массовых долях по (1.4), очевидно, что по реакциям 1, 2 и 3 количество кислорода для сжигания единицы массы топлива можно определить как

$$L_{O_2} = 8/3(C^P) + 8H^P + S^P. \quad (2.1)$$

При наличии в топливе кислорода можно сделать предположение, что кислород топлива связан с водородом топлива по реакции 2. Тогда количество свободного водорода топлива, который вступает в реакцию с кислородом воздуха, соответственно уменьшается. Получим

$$L_{O_2} = 8/3(C^p) + 8(H^p - O^p / 8) + S^p = 8/3(C^p) + 8H^p + (S^p - O^p) . \quad (2.2)$$

Учитывая, что в воздухе массовое содержание кислорода $m_{O_2} = 0,232$, масса воздуха, необходимая для полного сгорания единицы топлива, будет

$$L^0 = \frac{8/3(C^p) + 8H^p + (S^p - O^p)}{0,232} \text{ [кг возд. /кг т.]} . \quad (2.3)$$

В практических расчетах статики горения топлива определяют не массовое, а объемное количество воздуха горения. Это связано с необходимостью расчетов проходных сечений воздухопроводов. Объем воздуха относят к нормальным условиям. Учитывая плотность воздуха при нормальных условиях ($\rho_0 = 1,293 \text{ кг/м}^3$), теоретический объемный расход воздуха для полного сжигания единицы твердого или жидкого топлива составит

$$V^0 = L^0 / \rho_0 = 8,89C^p + 26,7H^p + 3,3(S^p - O^p) \text{ [м}^3\text{/кг т.]} . \quad (2.4)$$

Если состав топлива задан в массовых процентах, то объем воздуха получается

$$V^0 = 0,0889C^p + 0,267H^p + 0,033(S^p - O^p) . \quad (2.4a)$$

При выводе соотношений (2.2) – (2.4) предполагалось, что весь кислород воздуха расходуется на окисление горючих компонентов рабочей массы топлива. Однако, по мере выгорания топлива, количество кислорода уменьшается, а количество образовавшихся продуктов сгорания увеличивается. Это затрудняет доступ кислорода к горючим компонентам. Может получиться, что на выходе из устройства для сжигания топлива не все горючие компоненты топлива вступят в реакцию с кислородом воздуха. Поэтому, для обеспечения полного сгорания топлива приходится подавать в топочное устройство несколько большее количество воздуха.

Отношение действительного количества воздуха, подаваемого для сжигания единицы топлива, к теоретически необходимому количеству называют **коэффициентом избытка воздуха**.

$$\alpha = V_b / V^0 . \quad (2.5)$$

Коэффициент избытка воздуха зависит от рода топлива, способа его сжигания и т.д. Для газообразного топлива обычно $\alpha = 1,05 \div 1,1$; жидкого $\alpha = 1,1 \div 1,3$; твердого $\alpha = 1,2 \div 1,7$.

Наряду с расчетом воздуха горения, в процессе теплового расчета топочных устройств необходимо определять и количество образовавшихся продуктов сгорания. По реакциям 1,2 и 3 количество образующихся продуктов реакции при сгорании единицы топлива получается:

– количество образовавшегося CO_2 $m_{CO_2} = 11C^p/3$ [кг CO_2 /кг т.];

– количество H_2O с учетом влаги топлива $m_{H_2O} = 9H^P + W^P$ [кг H_2O /кг т.];

– количество SO_2 $m_{SO_2} = 2S^P$ [кг SO_2 / кг т.].

Кроме того, в продуктах сгорания содержится азот, внесенный с воздухом горения и содержащийся в топливе (предполагается, что азот не реагирует с кислородом). Тогда количество азота в продуктах сгорания (при $\alpha = 1$)

$$m_{N_2}^0 = 0,768L^0 + N^P \text{ [кг } N_2 \text{ /кг т.]}.$$

Считается, что в атмосферном воздухе содержится ~10г влаги на 1кг воздуха. Тогда содержание водяного пара

$$m_{H_2O}^0 = 9H^P + W^P + 0,01L^0 \text{ [кг } H_2O\text{/кг т.]}.$$

Общая масса продуктов сгорания при стехиометрическом горении будет содержать: трехатомные газы (CO_2 и SO_2), азот и водяной пар. Получим

$$L_{т.с.}^0 = 11C^P/3 + 2S^P + 0,768L^0 + N^P + 9H^P + W^P + 0,01L^0. \quad (2.6)$$

Если топливо сжигается с избытком воздуха, то в продуктах сгорания содержится избыточный влажный воздух, не участвующий в процессе горения $\Delta m_b = (\alpha - 1)L^0$ [кг в./кг т.]. Получим

$$L_{т.с.} = 11C^P/3 + 2S^P + 0,768L^0 + N^P + 9H^P + W^P + 0,01L^0 + \Delta m_b. \quad (2.7)$$

Анализируя (2.6) и (2.7) можно отметить, что содержание трехатомных газов (CO_2 и SO_2) в продуктах сгорания не зависит от избытка воздуха, а определяется составом топлива. Учитывая, что содержание серы в топливах, как правило, невелико, можно объединить в единый комплекс CO_2 и SO_2 , и теплофизические характеристики этого комплекса определять по свойствам CO_2 . Тогда

$$m_{RO_2} = m_{CO_2} + m_{SO_2} = 11/3 (C^P + 0,545S^P) \quad (2.8)$$

Сухими газами называют продукты сгорания без водяного пара. Тогда

$$L_{с.г.}^0 = 11/3 (C^P + 0,545S^P) + 0,768L^0 + N^P, \quad (2.9)$$

$$L_{с.г.} = 11/3 (C^P + 0,545S^P) + 0,768L^0 + N^P + (\alpha - 1)L^0. \quad (2.10)$$

Как оговаривалось выше, в практике расчета топочных устройств чаще определяется не массовое, а объемное количество воздуха горения, отнесенное к нормальным условиям. Кроме расчета воздухопроводов необходимо рассчитывать и проходные сечения газоходов. Поэтому представим выход продуктов сгорания в нормальных кубических метрах. Учитывая плотности газов при нормальных условиях $\rho_{CO_2}^0 = 1,963$, $\rho_{SO_2}^0 = 2,85$, $\rho_{N_2}^0 = 1,26$ [кг/нм³], $\rho_{H_2O}^0 = 0,804$ (условно) и $\rho_{воз}^0 = 1,293$ [кг/нм³], получим:

-объем CO_2 в продуктах сгорания $V_{CO_2} = \frac{m_{CO_2}}{\rho_{CO_2}^0} = \frac{11/3C^P}{1,963} = 1,868C^P,$

- объем SO_2 в продуктах сгорания $V_{SO_2} = \frac{m_{SO_2}}{\rho_{SO_2}^0} = \frac{2S^P}{2,85} = 0,7S^P,$

- теоретический объем N_2
$$V_{N_2}^0 = \frac{m_{N_2}}{\rho_{N_2}^0} = 0,79V^0 + 0,8N^P,$$

- тот же объем H_2O
$$V_{H_2O}^0 = \frac{m_{H_2O}}{\rho_{H_2O}^0} = 1,242(9H^P + W^P) + 0,0161V^0,$$

- объем избыточного влажного воздуха горения
$$\Delta V_B = (\alpha - 1)V^0.$$

Объем трехатомных газов составит:

$$V_{RO_2} = V_{CO_2} + V_{SO_2} = 1,868(C^P + 0,375S^P) \text{ [нм}^3 \text{/кг т.]},$$

теоретический объем сухих газов получится:

$$V_{с.г.}^0 = V_{RO_2} + V_{N_2} = 1,868(C^P + 0,375S^P) + 0,79V^0 + 0,8N^P, \quad (2.11)$$

действительный объем сухих газов:

$$V_{с.г.} = 1,868(C^P + 0,375S^P) + 0,79V^0 + 0,8N^P + (\alpha - 1)V^0. \quad (2.12)$$

Полный объем продуктов сгорания при стехиометрическом горении будет:

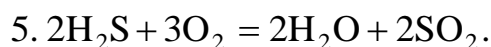
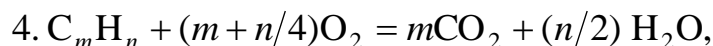
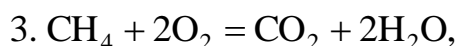
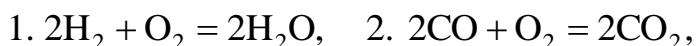
$$V_{п.с.}^0 = 1,868(C^P + 0,375S^P) + 0,79V^0 + 0,8N^P + 1,242(9H^P + W^P) + 0,0161V^0. \quad (2.13)$$

Обозначив $K^P = C^P + 0,375S^P$, получим при $\alpha > 1$

$$V_{п.с.} = 1,868K^P + 0,79V^0 + 0,8N^P + 1,242(9H^P + W^P) + 0,0161V^0 + (\alpha - 1)V^0. \quad (2.14)$$

Следует еще раз отметить, что в (2.11) ÷ (2.14) состав топлива принят в массовых долях. Чтобы получить эти же соотношения при задании состава топлива в процентах по массе, надо коэффициенты при K^P , N^P и у скобки $(9H^P + W^P)$ уменьшить в 100 раз.

Состав газообразного топлива обычно задается в объемных процентах. Реакции полного окисления компонентов газообразного топлива можно записать в виде



Тогда, учитывая, что молярные и объемные доли газа в смеси равны, получим объем кислорода, необходимый для полного сжигания одного нормального кубического метра газа.

$$V_{O_2}^0 = 0,5(H_2 + CO) + 2CH_4 + \sum(m + n/4)C_m H_n + 1,5H_2S - O_2. \quad (2.15)$$

В атмосферном воздухе кислорода по объему содержится 21%. Тогда необходимый объем воздуха для стехиометрического горения получится в виде

$$V^0 = 4,76[0,5(H_2 + CO) + 2CH_4 + \sum(m + n/4)C_m H_n + 1,5H_2S - O_2]. \quad (2.16)$$

В выражениях (2.15) и (2.16) состав топлива принят в объемных долях. При задании состава топлива в процентах по объему следует в (2.15) перед общим выражением поставить сомножитель 0,01, а коэффициент в (2.16) уменьшить в 100 раз.

По реакциям полного горения компонентов газообразного топлива (1 ÷ 5) легко определяется состав продуктов сгорания топлива, при задании его состава в объемных долях:

- объем трехатомных газов

$$V_{\text{RO}_2} = \text{CO} + \text{H}_2\text{S} + \text{CO}_2 + \text{CH}_4 + \sum m C_m H_n ; \quad (2.17)$$

- теоретический объем азота $V_{\text{N}_2}^0 = 0,79V^0 + \text{N}_2$; (2.18)

- теоретический объем водяного пара при влагосодержании газа d г вл./нм³ г.

$$V_{\text{H}_2\text{O}}^0 = [\text{H}_2 + \text{H}_2\text{S} + 2\text{CH}_4 + \sum n C_m H_n / 2] + 0,0124d + 0,0161V^0. \quad (2.19)$$

Стехиометрический объем продуктов сгорания:

$$V_{\text{п.с.}}^0 = V_{\text{RO}_2} + V_{\text{N}_2}^0 + V_{\text{H}_2\text{O}}^0. \quad (2.20)$$

При сжигании газа с $\alpha > 1$ в состав продуктов сгорания добавится избыточный влажный воздух. Тогда, обозначив $\Delta V_{\text{в}} = (\alpha - 1)V^0$, получим

$$V_{\text{п.с.}} = V_{\text{RO}_2} + V_{\text{N}_2}^0 + V_{\text{H}_2\text{O}}^0 + \Delta V_{\text{в}}. \quad (2.21)$$

Объем сухих газов можно получить из (2.20) и (2.21), если убрать из этих выражений $V_{\text{H}_2\text{O}}^0$, т.е. содержание водяного пара.

Таким образом, получены все соотношения, позволяющие для заданного твердого, жидкого или газообразного топлива определить количество воздуха, подаваемого на сжигание единицы топлива, и количественный состав продуктов сгорания.

2.2. Определение коэффициента избытка воздуха по составу продуктов сгорания

Коэффициент избытка воздуха является одной из важнейших эксплуатационных характеристик устройств, в которых реализуется процесс сжигания топлива (паровые котлы, промышленные печи и т.д.). При увеличении объема уходящих продуктов сгорания увеличивается и доля теплоты от сгорания топлива, которая теряется с этими газами.

Используя полученные выше уравнения материального баланса процесса горения, можно определить коэффициент избытка воздуха по содержанию (концентрации) в продуктах сгорания CO_2 , O_2 или N_2 .

Общий принцип определения коэффициента избытка воздуха состоит в том, что при полном сгорании топлива изменяется концентрация в сухих газах CO_2 , O_2 или N_2 при изменении α . В газоанализаторах исследуется предварительно осушенные продукты сгорания. Это вносит некоторые искажения в объемные доли продуктов сгорания, что особенно заметно для топлив, богатых водородными соединениями (природные газы, жидкое топливо).

Рассмотрим определение коэффициента избытка воздуха по концентрации CO_2 в продуктах сгорания. Если пренебречь содержанием серы и

азота в топливе (что справедливо для большинства твердых топлив), то теоретический объем сухих газов (при стехиометрическом горении) можно представить в виде

$$V_{с.г.}^0 = 1,868C^P + 0,79V^0, \quad (2.22)$$

а максимальная концентрация CO_2 в сухом газе составит

$$CO_2^{\max} = 1,868C^P / (1,868C^P + 0,79V^0). \quad (2.23)$$

Если в воздухе сгорает чистый углерод, то по стехиометрии реакции получается, что на образование одного моля CO_2 расходуется один моль кислорода. Учитывая объемное содержание кислорода в воздухе (0,21), получаем, что в случае сгорания чистого углерода $CO_2^{\max} = 0,21$.

Природное топливо кроме углерода содержит еще и водород, на окисление которого также расходуется кислород. Поэтому для такого топлива при стехиометрическом горении концентрация CO_2 в продуктах сгорания оказывается меньше, чем для чистого углерода. Тогда, введя некоторый коэффициент (топливный коэффициент Бунте), учитывающий расход кислорода на горение водорода и зависящий от состава топлива, получим

$$CO_2^{\max} = 0,21 / (1 + \beta). \quad (2.24)$$

Значение топливного коэффициента Бунте можно получить из выражения

$$L_{O_2}^0 = 8/3(C^P) + 8(H^P - O^P / 8). \quad (2.25)$$

Очевидно, что на горение одного моля водорода требуется в 3 раза большее количество кислорода, чем для сгорания углерода. Тогда топливный коэффициент Бунте можно определить, как отношение кислорода, пошедшего на горение водорода и на горение углерода, т.е.

$$\beta = (1 - 0,21)3(H^P - O^P / 8) / C^P = 2,37(H^P - O^P / 8) / C^P. \quad (2.26)$$

Таблица 2.1 – Значения топливного коэффициента

Топливо	CO_2^{\max}	β	Топливо	CO_2^{\max}	β
Водород	0	∞	Антрацит	20,4	0,03
Метан	11,7	0,79	Торф	19,6	0,07
Мазут	16	0,33	Бурый уголь	19,4	0,08
Каменный уголь	18,6	0,13	Окись углерода	34,7	- 0,315

Таким образом, зная состав топлива, можно рассчитать максимальную концентрацию CO_2 в продуктах сгорания, используя (2.24) и данные табл.2.1 или (2.26). Если же известен состав топлива, то максимальную концентрацию CO_2 в продуктах сгорания можно найти как

$$CO_2^{\max} = V_{CO_2} / V_{с.г.}^0. \quad (2.27)$$

При $\alpha > 1$ концентрация CO_2 в продуктах сгорания уменьшается из-за разбавления последних избыточным воздухом. Приравнявая количества CO_2 при $\alpha = 1$ и при $\alpha > 1$, получаем

$$CO_2^{\max} V_{с.г.}^0 = CO_2 V_{с.г.}. \quad (2.28)$$

Учитывая, что $V_{\text{с.г.}} = V_{\text{с.г.}}^0 + (\alpha - 1)V^0$,
 получим $\text{CO}_2^{\text{max}} V_{\text{с.г.}}^0 = \text{CO}_2 [V_{\text{с.г.}}^0 + (\alpha - 1)V^0]$,
 откуда

$$\alpha = \frac{\text{CO}_2^{\text{max}} V_{\text{с.г.}}^0}{\text{CO}_2 V^0} + (1 - V_{\text{с.г.}}^0 / V^0). \quad (2.29)$$

Для точного расчета коэффициента избытка воздуха по (2.29) следует по составу топлива рассчитать V^0 и $V_{\text{с.г.}}^0$. Действительная концентрация CO_2 в продуктах сгорания определяется экспериментальным путем, и по (2.29) находится коэффициент избытка воздуха. Однако для большинства твердых топлив с достаточной для практики степенью точности можно принять, что

$$V_{\text{с.г.}}^0 \approx V^0.$$

Тогда приближенно коэффициент избытка воздуха по экспериментально определенному содержанию CO_2 в продуктах сгорания может быть найден из

$$\alpha \approx \text{CO}_2^{\text{max}} / \text{CO}_2 \quad (2.30)$$

Это соотношение получило название «углекислотная формула для определения коэффициента избытка воздуха».

Вопросы для самопроверки

1. Что такое «теоретически необходимое» количество воздуха горения?
2. Что такое коэффициент избытка воздуха?
3. Запишите реакции окисления горючих компонентов твердого топлива.
4. Определите по этим реакциям количество кислорода для окисления 1 кг топлива.
5. Запишите реакции окисления компонентов газообразного топлива.
6. Определите по этим реакциям количество кислорода для окисления 1 м^3 газа.
7. Теоретический состав продуктов сгорания.
8. Действительный состав продуктов сгорания топлива.
9. Принцип определения коэффициента избытка воздуха по анализу продуктов сгорания.

2.3. Тепловой баланс процесса горения

При горении природного топлива развивается достаточно высокая температура. Если считать, что вся теплота, внесенная в топочное пространство при сжигании топлива, расходуется только на нагрев продуктов сгорания, то подобный процесс называют **адиабатным горением**. Температура продуктов сгорания при адиабатном горении называется **адиабатной температурой**. Тепловой баланс адиабатного горения топлива может быть представлен в виде

$$I_{\text{T}} + I_{\text{B}} + Q_{\text{H}}^{\text{p}} = I_{\text{п.с.}} = t_{\text{a}} (V_{\text{RO}_2} c'_{\text{pCO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}}^0 c'_{\text{pH}_2\text{O}} + V_{\text{N}_2}^0 c'_{\text{pN}_2} + \Delta V_{\text{B}} c'_{\text{pВЛ.В}}), \quad (2.31)$$

где $I_{\text{T}} = c_{\text{T}} t_{\text{T}}$ – физическая теплота, внесенная с единицей топлива (подогретого до t_{T}), или энтальпия топлива; $I_{\text{B}} = \alpha V^0 c'_{\text{pВЛ.В}} t_{\text{B}}$ – физическая теплота внесенная с

подогретым до t_b воздухом горения или энтальпия воздуха горения; Q_H^p – теплотворная способность топлива.

Из (2.31) можно определить адиабатную температуру продуктов сгорания в виде

$$t_a = \frac{I_T + I_B + Q_H^p}{V_{RO_2} c'_{pCO_2} + V_{H_2O}^0 c'_{pH_2O} + V_{N_2}^0 c'_{pN_2} + \Delta V_B c'_{p_{вл.в}}}. \quad (2.32)$$

Однако, по (2.32) t_a можно определить только последовательными приближениями, т.к. теплоемкости продуктов сгорания существенно зависят от неизвестной температуры.

Адиабатная температура продуктов стехиометрического горения без подогрева топлива и воздуха называется **жаропроизводительностью** топлива. Эта величина характеризует пригодность топлива для высокотемпературного процесса. Из (2.32) получаем

$$t_{ж} = \frac{Q_H^p}{V_{RO_2} c'_{pCO_2} + V_{H_2O}^0 c'_{pH_2O} + V_{N_2}^0 c'_{pN_2}}. \quad (2.33)$$

Наивысшую жаропроизводительность имеет СО ($t_{ж} = 2900^\circ\text{C}$), наименее – доменный газ ($t_{ж} = 1300^\circ\text{C}$).

Если в процессе горения топлива имеют место потери теплоты (неполнота сгорания топлива, потери через стенки топочной камеры и т.д.), то температура продуктов сгорания, определенная с учетом потерь теплоты, называется **калориметрической** температурой. Тогда

$$t_k = \frac{I_T + I_B + Q_H^p - Q_{пот}}{V_{RO_2} c'_{pCO_2} + V_{H_2O}^0 c'_{pH_2O} + V_{N_2}^0 c'_{pN_2} + \Delta V_B c'_{p_{вл.в}}}. \quad (2.34)$$

При тепловых расчетах установок, где в качестве теплоносителя используются продукты сгорания топлива (в частности – парогенераторов), часто приходится выполнять варианты расчетов температуры продуктов сгорания заданного топлива. Применение видоизмененной зависимости (2.34) для расчета температуры требует последовательных приближений из-за зависимости теплоемкости продуктов сгорания от температуры. Обойтись без последовательных приближений позволяет предварительно построенная для заданного топлива $I - t$ диаграмма продуктов сгорания. Обозначив

$$I_{п.с.}^0 = (V_{RO_2} c'_{pCO_2} + V_{H_2O}^0 c'_{pH_2O} + V_{N_2}^0 c'_{pN_2}) t \quad (2.35)$$

и задавая последовательно температуру (обычно с шагом 100°C) можно построить таблицу или диаграмму $I - t$ продуктов сгорания. Дополнительно строится зависимость

$$I_B^0 = V^0 c'_{p_{вл.в}} t \quad (2.36)$$

Энтальпия продуктов сгорания при заданном коэффициенте избытка воздуха α и при температуре t находится как

$$I_{п.с.} = I_{п.с.}^0 + (\alpha - 1) I_B^0 \quad (2.37)$$

Использование $I - t$ диаграммы видно из рис.2.1. Кроме того, при заранее

известном изменении коэффициента избытка воздуха по тракту продуктов сгорания можно построить серию кривых по (2.37) при различных значениях коэффициента избытка воздуха. Для более точных расчетов используют не $I - t$ диаграмму, а $I - t$ таблицу продуктов сгорания, построенную с интервалом 100°C , в пределах которого разрешается линейная интерполяция.

Чтобы найти изменение температуры продуктов сгорания при отводе от них некоторого количества теплоты Q при различных коэффициентах избытка воздуха до и после процесса отвода теплоты, надо использовать тепловой баланс в виде

$$I_2 = I_1 - Q. \quad (2.38)$$

По заданной температуре t_1 и соответствующему коэффициенту избытка воздуха определяется I_1 и из (2.38) находится искомая энтальпия I_2 . По $I - t$ таблице или диаграмме определяется искомая температура при заданном коэффициенте избытка воздуха.

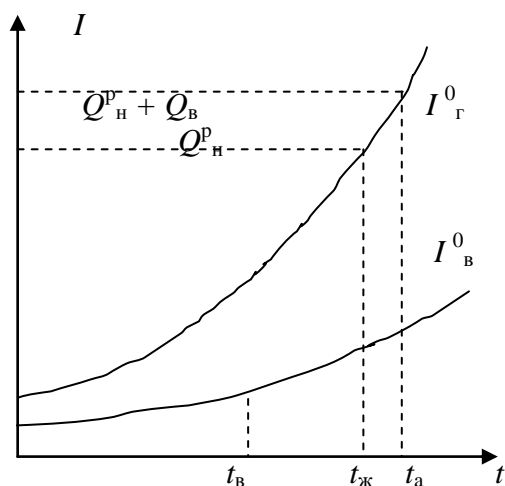


Рисунок 2.1 – $I - t$ диаграмма продуктов сгорания

Вопросы для самопроверки

1. Что называют «адиабатным горением»?

2. Запишите и поясните тепловой баланс адиабатного горения.

3. Что такое «адиабатная температура горения»?

4. Что такое «жаропроизводительность»?

5. Дайте определение «калориметрической» температуры горения.

6. Назначение и построение $I - t$ диаграммы продуктов сгорания.

7. Приведите пример использования

$I - t$ диаграммы.

3. ОСНОВЫ ХИМИЧЕСКОГО РАВНОВЕСИЯ

3.1. Принцип Ле Шателье – Брауна

Химические реакции в большинстве случаев обратимы, т.е. наряду с прямой реакцией (окисление – в случае горения) имеет место и обратная реакция разложения (диссоциации) продуктов реакции. Тогда реакции окисления следует записать в виде



Если компоненты реагирующих веществ контактируют достаточно долгое время, то в смеси устанавливается динамическое равновесие. В зависимости от внешних условий (температура, давление) равновесие может быть сдвинуто как в одну, так и в другую сторону. Наблюдения над химическими реакциями

привели к установлению принципа Ле Шателье - Брауна, согласно которому «при изменении внешних условий равновесие химической реакции смещается в сторону противодействия этим изменениям».

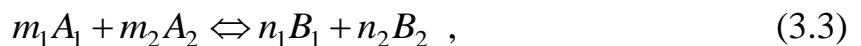
Для реакций горения (3.1) и (3.2) применение этого принципа приводит к следующим результатам. Прямые реакции (3.1) и (3.2) происходят с выделением теплоты (экзотермические), следовательно, при повышении температуры равновесие этих реакций сдвигается в сторону диссоциации продуктов сгорания и глубина реагирования уменьшается. В продуктах сгорания повышается содержание исходных компонентов.

Давление влияет на равновесие в том случае, когда реакция протекает с изменением объема реагирующих компонентов (числа молей). Для тех же реакций горения (3.1) и (3.2) повышение давления (сопровождающееся уменьшением объема) приводит также к увеличению в смеси исходных компонентов, т.е. к уменьшению глубины реагирования.

3.2. Закон действующих масс

Принцип Ле Шателье - Брауна только устанавливает направление смещения равновесия химических реакций, но не может количественно определить состав реагирующих компонентов. Термодинамические методы позволяют провести количественные расчеты равновесия химических реакций. В термодинамике доказывается, что, при стремлении системы к равновесию при постоянном давлении и температуре, изобарно-изотермический потенциал системы $Z = I - TS$ стремится к минимуму.

Тогда для реакции вида



где A, B – исходные вещества и продукты реакции, n, m – стехиометрические коэффициенты, условие минимума изобарно-изотермического потенциала дает выражение

$$\frac{p_{B_1}^{n_1} p_{B_2}^{n_2}}{p_{A_1}^{m_1} p_{A_2}^{m_2}} = e^{-\Delta Z/RT} = K_p. \quad (3.4)$$

Величина K_p называется константой равновесия химической реакции по парциальным давлениям и зависит только от температуры, а соотношение (3.4) выражает закон действующих масс. Согласно этому закону, связь между парциальными давлениями (а, следовательно, и массами) участвующих в реакции веществ определяется константой равновесия данной реакции. Для реакций (3.1) и (3.2) константы равновесия запишутся в виде

$$\frac{p_{\text{H}_2\text{O}}^2}{p_{\text{H}_2}^2 p_{\text{O}_2}} = K_{p1}, \quad \frac{p_{\text{CO}_2}^2}{p_{\text{CO}}^2 p_{\text{O}_2}} = K_{p2}.$$

Для выяснения зависимости равновесия химической реакции от давления следует перейти от парциальных давлений к концентрациям (мольным долям) реагирующих веществ. Если учесть, что $C_{A_1} = p_{A_1}/P$, $C_{B_1} = p_{B_1}/P$, и т.д., где

P – полное давление, то (3.4) можно записать в виде

$$\frac{C_{B_1}^{n_1} C_{B_2}^{n_2}}{C_{A_1}^{m_1} C_{A_2}^{m_2}} = K_c = K_p P^{(n_1+n_2-m_1-m_2)}, \quad (3.5)$$

где K_c – константа равновесия по концентрациям. Из (3.4) следует, что K_c безразмерная величина, а K_p – размерная, если сумма стехиометрических коэффициентов в показателе степени P отлична от 0. Если реакция идет без изменения числа молей, то константы равновесия по парциальным давлениям и концентрациям равны.

Следует отметить, что применение термодинамических методов предполагает поведение реагентов как идеальных газов. Однако если в реакции участвует и твердая фаза,



равновесие газовых компонент реакции также может быть представлено в виде

$$p_{O_2} / p_{CO_2} = K_p = K_c. \quad (3.7)$$

Вопросы для самопроверки

1. Что такое обратимые химические реакции?
2. Сформулируйте принцип Ле Шателье – Брауна.
3. Сформулируйте закон действующих масс и запишите выражение константы равновесия по парциальным давлениям для реакции:
 $2H_2 + O_2 \rightleftharpoons 2H_2O$.
4. Запишите для этой же реакции константу равновесия по концентрациям. Как она связана с константой равновесия по парциальным давлениям?

3.3. Специфические процессы сжигания природного газа

При горении природного газа образующийся факел продуктов сгорания и сама зона горения имеют весьма низкую радиационную способность, что существенно ухудшает лучистый перенос теплоты от факела к нагреваемым изделиям. Для увеличения светимости газового факела в него вносят компоненты, обладающие хорошей радиационной способностью. Это может быть проведено различными методами. Во-первых, совместно с природным газом сжигается некоторое количество мазута, который при разложении в зоне высоких температур выделяет сажистый углерод, обладающий хорошей радиационной способностью. Во-вторых, специальным методом сжигания природного газа, при котором он вначале разлагается (реформируется), выделяя при этом также сажистый углерод.

3.3.1. Реформация природного газа с выделением сажистого углерода

Для осуществления подобного процесса сжигания природного газа необходимы следующие условия:

- коэффициент избытка воздуха меньше 1 ($\alpha = 0,4 \div 0,6$);
- плохое перемешивание природного газа и первичного воздуха;

– температура процесса не ниже 900°C.

Получающиеся при этом продукты сгорания содержат компоненты неполного горения топлива и должны далее дожигаться, чтобы избежать потерь теплоты от химического недожога топлива.

Второе условие процесса реформации позволяет предположить, что количество топлива, пропорциональное коэффициенту избытка воздуха, сгорает полностью, а оставшиеся углеводороды топлива разлагаются с выделением углерода по реакции



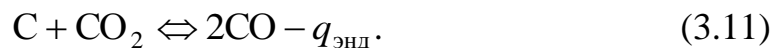
При температуре выше 800°C все высокомолекулярные углеводороды разлагаются полностью по (3.8). В то же время метан, разлагающийся по реакции



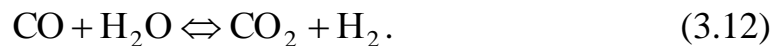
полностью не разлагается и может содержаться в продуктах сгорания. Тогда состав газообразных продуктов реформации будет

$$V_{п.с.} = V_{N_2} + V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{CO} + V_{H_2} + V_{CH_4}. \quad (3.10)$$

Появление CO в продуктах реакции объясняется наличием свободного углерода, появившегося по реакциям (3.8) и (3.9) и, следовательно, наличием восстановительной реакции



Общее содержание CO, CO₂, H₂ и H₂O в продуктах реформации определяется равновесием реакции



В уравнении (3.10) содержатся 5 неизвестных. Объем азота определяется легко как

$$V_{N_2} = 0,79\alpha V^0 + N_2. \quad (3.13)$$

Объем CO₂ без учета реакции (3.11) найдется как

$$V'_{CO_2} = \alpha(CO + CH_4 + \sum mC_m H_n) + CO_2. \quad (3.14)$$

Объем водяного пара

$$V_{H_2O} = \alpha(2CH_4 + \sum nC_m H_n/2) + 0,0161\alpha V^0. \quad (3.15)$$

Обозначим количество метана, разложившегося по (3.9) как Y , а количество CO₂, восстановившегося по (3.11) как X . Тогда количество свободного водорода, образовавшегося по (3.8) и (3.9) будет

$$V_{H_2} = 2Y + (1 - \alpha)\sum nC_m H_n/2, \quad (3.16)$$

а количество окиси углерода, образовавшейся по (3.11)

$$V_{CO} = 2X. \quad (3.17)$$

Свободного метана в продуктах сгорания останется

$$V_{CH_4} = (1 - \alpha)CH_4 - Y = A - Y \quad (3.18)$$

Константа равновесия реакции (3.9) в предположении, что $P = 1$, записанная для концентраций, будет иметь вид

$$\frac{[2Y + (1 - \alpha)\sum nC_m H_n / 2]^2}{A - Y} = K_{c1}, \quad (3.19)$$

откуда для известной температуры процесса легко определяется Y .

Константа равновесия по концентрации для реакции (3.12) может быть представлена

$$\frac{2X \cdot V_{H_2O}}{(V'_{CO_2} - X)[2Y + (1 - \alpha)\sum nC_m H_n / 2]} = K_{c2}, \quad (3.20)$$

откуда может быть определен X и содержание CO и CO_2 в продуктах сгорания при данной температуре. После этого находится общий состав газообразных продуктов сгорания.

Количество образовавшегося сажистого углерода можно найти

$$C_T = [Y - X + (1 - \alpha)\sum mC_m H_n] \cdot 12 / 22,4 \text{ [кг/нм}^3 \text{ г.]}, \quad (3.21)$$

где 12 – молекулярный вес углерода, 22,4 – объем моля газа при нормальных условиях.

Теплотворную способность реформированного газа можно определить, используя (1.9) и (1.10)

$$Q'_H = 33900C_T + 10800V_{H_2} + 12600V_{CO} + 35900V_{CH_4} \text{ [кДж/нм}^3 \text{ г.]}. \quad (3.22)$$

Следует учесть, что реакция (3.11) экзотермическая, т.е. для ее протекания необходимо затратить теплоту, и для восстановления X [$\text{м}^3\text{CO}_2/\text{нм}^3\text{г}$] расходуется количество теплоты

$$Q_{\text{энд}} = q_{\text{энд}} X. \quad (3.23)$$

Температуру адиабатного горения при реформации с сажеобразованием можно найти из уравнения теплового баланса

$$I_B + Q_H^c - Q'_H - Q_{\text{энд}} = t_a (V_{CO_2} c'_{pCO_2} + V_{H_2O} c'_{pH_2O} + V_{N_2} c'_{pN_2} + V_{CO} c'_{pCO} + V_{CH_4} c'_{pCH_4} + V_{H_2} c'_{pH_2}). \quad (3.24)$$

Как указывалось выше, образовавшийся при реформации газ обладает достаточно высокой теплотой горения и в дальнейшем дожигается, давая факел продуктов сгорания с хорошей радиационной способностью. Теоретический расход вторичного воздуха для дожигания продуктов реформации определяется как

$$V_{\text{вт.в}}^0 = 8,89C_T + 4,76(2V_{CH_4} + 0,5V_{H_2} + 0,5V_{CO}). \quad (3.25)$$

3.3.2. Реформация газообразного топлива без сажеобразования

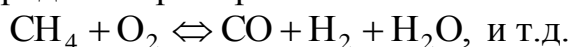
Наличие в продуктах полного сгорания топлива CO_2 и H_2O , являющихся хорошими окислителями (особенно при высоких температурах), приводит к окислению металла, нагреваемого в пламенных печах, отапливаемых газом. Опыт эксплуатации нагревательных печей показал, что наличие в атмосфере печи восстановителей (CO , H_2) приводит к резкому уменьшению окисления (угара) металла, а при относительном содержании $V_{CO}/V_{CO_2} \geq 3,5$; $V_{H_2}/V_{H_2O} \geq 1,5$ угара практически не происходит. Подобная

атмосфера в печи называется **безокислительной**.

Реформация газообразного топлива без сажеобразования предназначена для образования в рабочем пространстве пламенных печей безокислительной атмосферы. Естественно, конструкция печей при этом усложняется, т.к. уходящие из рабочего пространства печи продукты сгорания содержат горючие компоненты и требуют дальнейшего дожигания. Условия реформации газообразного топлива без сажеобразования следующие:

- коэффициент избытка воздуха меньше 1 ($\alpha = 0,4 \div 0,6$);
- хорошее перемешивание топлива и воздуха в специальных горелках перед реформацией.

При этом наряду с реакциями полного горения имеют место и реакции неполного горения, которые требуют существенно меньшего количества кислорода. Например:



Кроме того, хорошее перемешивание газа и воздуха позволяет предположить, что в продуктах сгорания не содержатся исходные углеводороды топлива. Тогда состав продуктов реформации можно представить в виде

$$V_{\text{п.с.}} = V_{\text{N}_2} + V_{\text{CO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{CO}} + V_{\text{H}_2} [\text{м}^3/\text{м}^3 \text{ г.}]. \quad (3.26)$$

Пусть состав топлива в объемных долях имеет вид

$$\text{CH}_4 + \text{C}_2\text{H}_6 + \text{CO}_2 + \text{N}_2 = 1. \quad (3.27)$$

Обозначим неизвестные в (3.26) $V_{\text{CO}_2} = X$; $V_{\text{H}_2\text{O}} = Y$; $V_{\text{CO}} = Z$; $V_{\text{H}_2} = U$.

Объем воздуха горения $V_{\text{в}} = \alpha \cdot 4,76 (2\text{CH}_4 + 3,5\text{C}_2\text{H}_6)$.

Объем азота в продуктах сгорания $V_{\text{N}_2} = 0,79V_{\text{в}} + \text{N}_2$.

Составим баланс углерода в исходных веществах и продуктах сгорания:

$$\text{CH}_4 + 2\text{C}_2\text{H}_6 + \text{CO}_2 = X + Z. \quad (3.28)$$

Составим баланс кислорода в исходных веществах и продуктах сгорания:

$$\text{CO}_2 + 0,21V_{\text{в}} + 0,5 \cdot 0,0161V_{\text{в}} = X + 0,5Y + 0,5Z. \quad (3.29)$$

Составим баланс водорода в исходных веществах и продуктах сгорания:

$$2\text{CH}_4 + 3\text{C}_2\text{H}_6 + 0,0161V_{\text{в}} = Y + U. \quad (3.30)$$

Наличие в продуктах сгорания CO_2 , CO , H_2O и H_2 приводит к упомянутой выше реакции (3.12).

Равновесное содержание компонентов в продуктах сгорания должно определяться константой равновесия реакции (3.12):

$$\frac{X \cdot U}{Z \cdot Y} = K_{c2} \quad (3.31)$$

Таким образом, получена система из 4 уравнений (3.28) ÷ (3.31) с 4 неизвестными, решение которой позволяет найти все компоненты продуктов реформации.

Для определения теплотворной способности продуктов реформации воспользуемся (1.10)

$$Q'_H = 10800V_{H_2} + 12600V_{CO} [\text{кДж/м}^3 \text{ г}]. \quad (3.32)$$

Тогда тепловой баланс процесса реформации получим в виде

$$I_B + Q'_H - Q'_H = t_a (V_{N_2} c'_{pN_2} + V_{CO_2} c'_{pCO_2} + V_{H_2O} c'_{pH_2O} + V_{CO} c'_{pCO} + V_{H_2} c'_{pH_2}).$$

Количество вторичного воздуха для дожигания продуктов реформации

$$V_{вт.в}^0 = 4,76(0,5V_{H_2} + 0,5V_{CO}). \quad (3.33)$$

Вопросы для самопроверки

1. Условия процесса реформации газообразного топлива с сажеобразованием. Назначение процесса.
2. Допущения при расчете этого процесса и состав продуктов сгорания.
3. Дополнительные реакции, определяющие количественный состав продуктов сгорания при данных условиях.
4. Принцип расчета количественного состава продуктов сгорания.
6. Реформация природного газа без сажеобразования. Назначение процесса.
7. Допущения при расчете этого процесса и состав продуктов сгорания.
8. Принцип расчета количественного состава продуктов сгорания.
9. Тепловой баланс процесса реформации природного газа без сажеобразования.

4. ДИНАМИКА ГОРЕНИЯ

4.1. Основные положения динамики химических реакций

Акты химического превращения (химические реакции) происходят при соударении молекул реагентов, т.е. при достаточном их сближении, когда начинают проявляться силы межмолекулярного взаимодействия. При этом кинетическая энергия соударяющихся молекул переходит в потенциальную энергию и может быть затрачена на разрушение первоначальных связей в молекулах. Однако эти связи могут быть разрушены только тогда, когда кинетическая энергия соударяющихся молекул превышает некоторый предел, называемый **энергией активации**. Тогда для реакции вида $A + B \Leftrightarrow C$, требующей столкновения двух молекул можно записать

$$\frac{mU_n^2}{2} \geq E', \quad (4.1)$$

где $m = m_a m_b / (m_a + m_b)$ – приведенная масса молекул.

Полное число столкновений молекул A и B за единицу времени в единице объема

$$Z = \bar{U} \sigma N_a N_b, \quad (4.2)$$

где $\bar{U} = \sqrt{8kT/(\pi m)}$ – средняя тепловая скорость молекул; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ [Дж/К] – постоянная Больцмана; σ – сечение соударения (для модели твердых шаров $\sigma = \pi (r_a + r_b)^2$; N_a, N_b – число молекул в единице объема (концентрация молекул).

Под скоростью химической реакции понимают число актов химического

превращения в единицу времени в единице объема. Тогда из общего числа соударений молекул реагентов по (4.2) следует выделить только те, в которых выполняется условие (4.1). Если считать, что распределение молекул по их скорости подчиняется закону Максвелла, то число активных соударений, когда $U_n \geq \sqrt{2E'/m}$ составит:

$$Z_a = \bar{U} \sigma N_a N_b e^{-E'/(kT)}. \quad (4.3)$$

Если отнести энергию активации не к одной молекуле, а к молю газа, то

$$Z_a = \bar{U} \sigma N_a N_b e^{-E/(RT)}, \quad (4.4)$$

где $R = N_A \cdot k = 6,0246 \cdot 10^{26} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} = 8314$ [Дж/(моль К)] – универсальная газовая постоянная.

Следует учесть, что не все столкновения молекул, энергия которых превышает энергию активации, приводят к химическому превращению. Молекулы являются сложными комплексами, и необходимо, чтобы при соударении молекулы были должным образом сориентированы между собою. Введем вероятность того, что молекулы при соударении имеют должную пространственную ориентацию (вероятностный фактор $P = 1 \div 10^{-7}$). Тогда

$$W = P Z_a e^{-E/(RT)} = k_0 N_a N_b e^{-E/(RT)}. \quad (4.5)$$

Величина k_0 , пропорциональная числу столкновений и вероятностному фактору, называется **постоянной скорости реакции**. Под коэффициентом скорости химической реакции понимают величину

$$k = k_0 e^{-E/(RT)} \quad (4.6)$$

Скорость химической реакции можно определить и как скорость изменения концентрации вещества. Тогда, если C – концентрация,

$$W = -\frac{dC}{d\tau} = k_0 C_a C_b e^{-E/(RT)} \quad (4.7)$$

Уравнения (4.5) и (4.7) выражают **закон Аррениуса**, согласно которому скорость химической реакции зависит от температуры по экспоненциальному закону.

В рамках рассматриваемой теории величины E , k_0 определяются экспериментально, путем обработки опытных данных.

Для реакций горения, например $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{H}_2\text{O} \pm Q_p$, соотношение (4.7) характеризует только материальный баланс реакции. В действительности горение водорода протекает через промежуточные этапы, в которых принимают участие отдельные атомы и радикалы. Для таких реакций энергия активации существенно меньше, скорость реакции больше. Однако и для более сложных реакций можно формально записать скорость реакции по закону Аррениуса пропорционально концентрациям реагентов. Постоянную скорости реакции и показатели степени при концентрациях можно подобрать таким образом, чтобы хорошо удовлетворялись экспериментальные данные.

Сумма показателей степени при концентрациях называется **порядком реакции**, а постоянная скорости реакции имеет размерность, зависящую от

порядка реакции. Для реакции 1-го порядка k_0 [с⁻¹], для 2-го – [м³/(моль·с)].

Протекание упомянутой выше обратимой реакции горения водорода можно представить следующим образом. Для осуществления прямой реакции необходимо преодолеть некоторый энергетический барьер E_1 , после которого реакция протекает самопроизвольно до нового энергетического уровня. В результате прямой реакции выделяется энергия Q_p , равная разности первого и второго энергетического уровня. При протекании обратной реакции необходимо преодолеть больший энергетический барьер E_2 и при возвращении системы на первый уровень происходит поглощение энергии Q_p .

Проведем более подробный анализ зависимости скорости химической реакции от температуры. Воспользуемся зависимостью (4.6) и рассмотрим свойства функции

$$f(T) = k/k_0 = e^{-E/(RT)}. \quad (4.8)$$

Очевидно, что при $T = 0$ $f(T) = 0$, а при $T \Rightarrow \infty$ $f(T) \Rightarrow 1$. На кривой $f(T)$ имеется точка перегиба. Получим

$$f' = \frac{E}{RT^2} e^{-E/(RT)}, \quad f'' = \left[-\frac{2E}{RT^3} + \frac{E^2}{R^2 T^4} \right] e^{-E/(RT)} = 0, \text{ и } T_{\text{п}} = E/(2R).$$

При $T < T_{\text{п}}$ скорость реакции весьма быстро растет с ростом температуры. В дальнейшем скорость реакции замедляется. Если учесть, что энергия активации для различных реакций лежит в пределах $40 < E < 400$ [МДж/моль], то температура перегиба лежит в пределах $2400 < T_{\text{п}} < 24000\text{K}$, т.е. практически не достигается при горении органического природного топлива. Поэтому будем считать, что скорость реакции горения достаточно быстро увеличивается с ростом температуры.

Вопросы для самопроверки

1. Дайте определение скорости химической реакции.

2. Что такое «энергия активации»?

3. Как зависит скорость химической реакции от температуры?

Сформулируйте закон Аррениуса.

4.2. Динамика горения газовых смесей

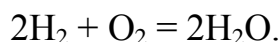
Химическая реакция называется **гомогенной**, если реагирующие вещества находятся в одинаковом фазовом состоянии. При **гетерогенной** реакции вещества находятся в различных фазовых состояниях. Если учесть, что кислород, принимающий участие в реакциях горения, находится в газообразном состоянии, то сжигание газообразного топлива представляет собою гомогенный процесс. Анализ динамики горения топлива начнем с простейшего случая гомогенных реакций.

4.2.1. Цепные реакции горения

Расчетные значения скорости реакции горения газовых смесей, полученные методами формальной кинетики, оказываются существенно ниже

реальных скоростей горения. Как уже отмечалось, реакции горения чаще всего идут через промежуточные стадии (простейшие реакции), в которых участвуют отдельные атомы и радикалы, и, как следствие, имеющие низкие энергии активации. Это атомы Н, О, радикалы ОН, НО₂, перекиси Н₂О₂ и т.д. Наличие подобных **активных центров** подтверждается спектральным анализом пламени, по данным которого концентрация Н и ОН в факеле на много порядков выше, чем их термодинамически равновесные значения. К тому же, концентрация Н во много раз выше, чем других активных центров. Механизм протекания реакций с участием активных центров изучается уже более 30 лет. Большой вклад в эти исследования внесен акад. Семеновым.

Рассмотрим механизм цепных реакций на примере горения водорода по реакции

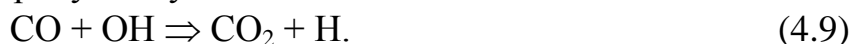


Можно записать следующий набор предположительных промежуточных реакций:

1. $\text{H}_2 + \text{O}_2 \Rightarrow 2\text{OH}$ – столкновение двух высокоэнергетических молекул с образованием активных центров;
2. $\text{OH} + \text{H}_2 \Rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{H}$ – продолжение цепи с образованием конечного продукта;
3. $\text{H} + \text{O}_2 \Rightarrow \text{OH} + \text{O}$,
4. $\text{O} + \text{H}_2 \Rightarrow \text{OH} + \text{H}$ – реакции ветвления цепи, когда из 1-го центра образуются 2;
5. $\text{H} + \text{стенка} \Rightarrow 0,5\text{H}_2$, $\text{O} + \text{стенка} \Rightarrow 0,5\text{O}_2$ и т.д. – условные реакции обрыва цепи на стенках реакционного сосуда;
6. $\text{OH} + \text{H} + \text{M} \Rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{M}$ – реакция обрыва цепи в объеме при тройном столкновении с нейтральной молекулой.

С помощью данного набора гипотетических реакций объясняются некоторые особенности горения водорода. После воспламенения, когда реакции ветвления цепи преобладают над реакциями обрыва, скорость горения (получения Н₂О) определяется реакцией (2) с весьма значительной постоянной скорости реакции ($k_2 = 7 \cdot 10^{12} \sqrt{T} e^{-42000/(RT)}$).

Реакция горения окиси углерода $2\text{CO} + \text{O}_2 = 2\text{CO}_2$ протекает с крайне низкой скоростью. При добавлении к смеси водяного пара или водорода скорость реакции возрастает на несколько порядков, т.к. радикал ОН и другие активные центры имеют малую энергию активации. Реакция продолжения цепи с образованием конечного продукта будет



При горении натуральных и искусственных газообразных топлив присутствие водорода (образующегося при разложении углеводов) и водяного пара обеспечивает протекание горения по цепному механизму.

4.2.2. Изотермическое цепное воспламенение

Под воспламенением понимают переход от медленной реакции окисления

к процессу с возрастающей во времени скоростью реакции. Исходные вещества после воспламенения расходуются за доли секунды.

Рассмотрим простейшую схему цепной реакции, когда в реакциях участвует один активный центр (пусть Н, т.к. его концентрация при горении водорода наибольшая). Из приведенных выше реакций следует, что их скорость имеет первый порядок по концентрации активных центров. Пусть текущая концентрация активного центра n , а скорость первичного зарождения активного центра (по реакции 1) W_0 . Константы скорости реакций разветвления (реакции 3,4) обозначим f , а обрыва цепи (реакции 5,6) – g . Скорость образования активных центров можно представить в виде

$$dn/d\tau = W_0 + (f - g)n. \quad (4.10)$$

Реакция продолжения цепи с образованием конечного продукта не изменяет концентрацию активных центров и не учитывается в (4.10). Интегрируя (4.10) при условии $n = 0$ при $\tau = 0$, получим

$$n = W_0(e^{\varphi\tau} - 1)/\varphi, \quad (4.11)$$

где $\varphi = f - g$. Скорость образования конечного продукта по реакции 2 пропорциональна концентрации активного центра в виде $W = k \cdot n$. Тогда

$$W = W_0(e^{\varphi\tau} - 1) \cdot k/\varphi. \quad (4.12)$$

Если $\varphi < 0$, т.е. скорость ветвления цепи меньше скорости обрыва, то концентрация активного центра и скорость реакции 2 с течением времени стремятся к стационарным значениям $\tau \rightarrow \infty$, $n \rightarrow -W_0/\varphi$, $W \rightarrow -kW_0/\varphi$. Т.к. скорость зарождения первичных центров W_0 весьма мала, то и скорость образования конечного продукта также мала и происходит процесс окисления без воспламенения.

При $\varphi > 0$ концентрация активных центров и, соответственно, скорость реакции образования конечного продукта непрерывно возрастает во времени, т.е. происходит горение смеси. Очевидно, что условие $\varphi = 0$ является границей перехода от окисления к горению смеси и представляет собою условие цепного воспламенения.

Вопросы для самопроверки

1. Суть понятия «активные центры» и цепной механизм горения газовой смеси.
2. Набор гипотетических реакций цепного механизма горения водорода.
3. Условие изотермического самовоспламенения.

4.2.3. Адиабатное тепловое самовоспламенение

Изотермическое воспламенение имеет только теоретическое значение и позволяет выяснить механизм процесса горения. Наличие тепловыделения и, соответственно, разогрева смеси вносит существенные изменения в процесс реагирования. Рассмотрим влияние тепловыделения на протекание реакции горения. Основными величинами, характеризующими процесс, будем считать температуру T и концентрацию C , изменяющиеся во времени.

Пусть камера сгорания имеет объем V и заполнена гомогенной горючей смесью с параметрами T_0, C_0 , тепловой эффект реакции Q_p . Будем считать начальную температуру смеси достаточно высокой, а реакцию горения полагаем подчиняющуюся закону Аррениуса. Экспериментальные исследования процесса горения показали, что с достаточной для практики точностью можно считать скорость гомогенной реакции пропорциональной концентрации только топлива. Тогда скорость реакции

$$W = -dC/d\tau = k_0 C e^{-E/(RT)}. \quad (4.13)$$

В случае адиабатного горения теплота, выделенная в процессе реакции, идет только на нагрев продуктов сгорания. Тогда тепловой баланс процесса можно представить как

$$dQ = Q_p W V dt = c_p V dT, \quad (4.14)$$

где c, ρ – теплоемкость и плотность смеси реагентов. Предполагая эти характеристики не зависящими от температуры и состава смеси, проинтегрируем (4.14) с учетом (4.13) от начальных условий T_0, C_0 до текущих значений. Получим

$$Q_p (C_0 - C)/(c_p) = T - T_0. \quad (4.15)$$

При $\tau \rightarrow \infty$ концентрация горючего $C \rightarrow 0$, а температура становится равной температуре адиабатного горения. Т.е.

$$T_a = T_0 + Q_p C_0/(c_p). \quad (4.16)$$

Тогда, обозначив $\theta = T/T_a, \sigma = C/C_0$, получим из (4.15) с учетом (4.16)

$$\sigma = (1 - \theta)/(1 - \theta_0). \quad (4.17)$$

т.е. подобие поля концентрации и температуры во времени.

Из (4.14) с учетом (4.13) получим уравнение теплового баланса в виде

$$Q_p k_0 C e^{-E/(RT)} = c_p dT/d\tau, \quad (4.18)$$

или

$$dT/d\tau = k_0 C Q_p e^{-E/(RT)} / (c_p). \quad (4.19)$$

Учитывая, что для реакции первого порядка размерность константы скорости $[c^{-1}]$, приведем (4.19) к безразмерному виду. Приняв $\xi = k_0 \tau$ и учтя принятые выше обозначения θ и σ , получим

$$d\theta/d\xi = (1 - \theta_0) \sigma e^{-Arr/\theta}, \quad (4.20)$$

где $Arr = E/(RT_a)$ – критерий Аррениуса. Учитывая (4.17), из (4.20) получается

$$d\theta/d\xi = (1 - \theta) e^{-Arr/\theta} \quad \text{или} \quad d\xi = \frac{e^{Arr/\theta}}{1 - \theta} d\theta. \quad (4.21)$$

Точное решение (4.21) невозможно, поэтому решение подобных уравнений проводят на ЭВМ.

Приведенный выше критерий Аррениуса является мерой реакционной способности смеси. Чем выше энергия активации и ниже адиабатная температура, тем выше критерий Аррениуса и тем труднее протекают реакции горения.

Графическое представление решения уравнение (4.21) приведено на рис.4.1. Из решения видно, что адиабатная реакция с некоторого момент времени становится заметной, т.е. смесь воспламеняется. Длительность скрытого протекания процесса от смешения компонентов до появления внешних признаков реакции называют **временем индукции**.

Предполагается, что это время до первого максимума второй производной. Температура, соответствующая этой точке называется температурой воспламенения.

Из численного решения (4.21) следует, что период индукции может быть определен в безразмерном виде как

$$\xi_{ад} = 0,0125 \exp(Arr/\theta_0), \quad (4.22)$$

а температура воспламенения получена в виде

$$\theta_B = 0,6 \exp(0,04 Arr). \quad (4.23)$$

Приведенные соотношения справедливы при $0,5 \leq Arr \leq 10$. Из (4.23) следует, что температура воспламенения не зависит от начальной температуры смеси.

Максимум тепловыделения соответствует максимуму первой производной, т.е. $\theta' = 0$. Температуру в этой точке можно найти из условия $\theta'' = 0$, а, используя (4.21), получаем

$$\theta_* = 0,5 Arr (\sqrt{1 + 4/Arr} - 1). \quad (4.24)$$

Из полученного выражения следует, что температура максимума тепловыделения также не зависит от начальной температуры.

Если принять за время горения период резкого роста температуры между экстремумами второй производной, то получается из решения (4.21) выражение

$$\Delta \xi_r = \frac{1 - \theta_0}{1 - \theta_*} \exp(Arr/\theta_*). \quad (4.25)$$

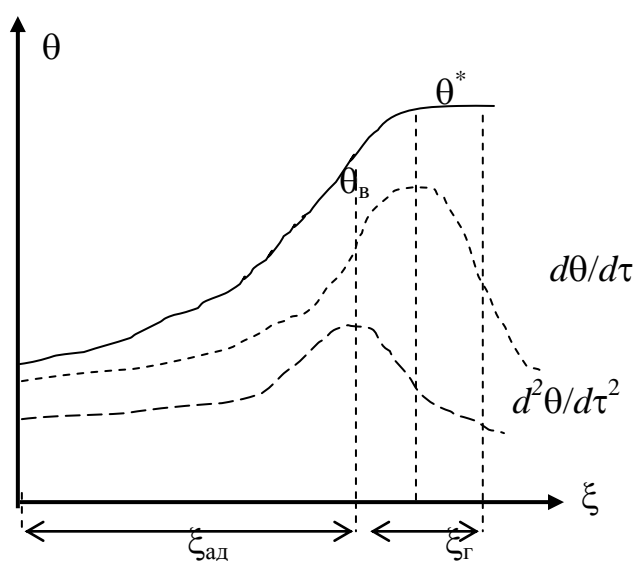


Рисунок 4.1 – График решения (4.22) и его производные

Сравнение (4.23) и (4.25) показывает, что время горения составляет очень малую долю от времени индукции, т.е. весь процесс адиабатного самовоспламенения определяется в основном временем индукции.

Вопросы для самопроверки

1. Запишите уравнение теплового баланса при адиабатном самовоспламенении.
2. Запишите уравнение материального баланса при этом же условии.
3. Что такое «период индукции», от чего он зависит?

4. Критерий Аррениуса, его влияние на процесс воспламенения.
 5. Соотношение между временем индукции и временем горения.

4.2.4. Воспламенение при наличии теплоотвода

Если реакционный сосуд, в котором происходит горение топлива, участвует в теплообмене с окружающей средой, процесс воспламенения резко изменяется. В условиях адиабатного горения топлива поля концентрации и температуры подобны, а при наличии теплоотвода необходимо учитывать реальное распределение температуры и концентрации реагентов по сечению сосуда. При постоянной температуре стенки сосуда ($T_{ст} = const$) вблизи стенки скорость реакции меньше из-за малой температуры. В центре сосуда температура выше и, соответственно, выше скорость реакции, что приводит к уменьшению концентрации реагентов в центре сосуда. Наличие градиента концентрации по сечению сосуда приводит к возникновению диффузионного потока массы. Поэтому задача воспламенения при наличии теплоотвода требует решения системы дифференциальных уравнений теплопроводности и диффузии с учетом выделения теплоты и расхода массы реагентов. Граничные условия должны учитывать отвод теплоты к стенке сосуда и непроницаемость стенок для реагентов. Полное аналитическое решение подобной задачи наталкивается на непреодолимые трудности. Поэтому существуют два подхода к упрощенному решению данной задачи. Первый, принадлежащий Франк-Каменецкому, рассматривает квазистационарное распределение температуры и концентрации реагентов, и из условия существования однозначного решения определяются условия воспламенения и горения смеси. Вторым подходом, принадлежащим Семенову, рассматривается нестационарная задача теплопроводности при усредненной по сечению температуре и концентрации реагентов. Рассмотрим второй подход к данной задаче.

Пусть конвективный перенос теплоты внутри сосуда весьма велик и температура выровнена по сечению сосуда. Интенсивность переноса теплоты от реагирующей смеси к стенке сосуда постоянна. Тогда тепловой баланс подобного процесса можно представить в виде

$$c_p V dT = Q_p k_0 C e^{-E/(RT)} d\tau - \alpha F (T - T_{ст}) d\tau, \quad (4.26)$$

т.е. теплота, расходуемая на изменение внутренней энергии реагентов, равна разности теплоты, выделенной в результате реакции, и теплоты, отведенной к стенкам сосуда. Уравнение материального баланса будет иметь вид

$$dC = -k_0 C e^{-E/(RT)} d\tau. \quad (4.27)$$

Разделив уравнение (4.26) на $V c_p k_0 d\tau$, и учитывая принятые выше обозначения, получим

$$d\theta/d\xi = (1 - \theta_0) \sigma e^{-A\pi/\theta} - \mu(\theta - \theta_{ст}), \quad (4.28)$$

где $\mu = \alpha F / (V c_p k_0)$ – безразмерный критерий теплоотвода. Уравнение (4.27) в безразмерном виде представится как

$$d\sigma/d\xi = -\sigma e^{-A\pi/\theta}. \quad (4.29)$$

Учитывая принятое выше допущение об усреднении по объему концентрации и температуры, без особой ошибки можно считать, что

$$(1 - \theta_0) \sigma = 1 - \theta. \quad (4.30)$$

Тогда (4.28) можно интерпретировать как

$$d\theta/d\xi = (1 - \theta) e^{-Arr/\theta} - \mu(\theta - \theta_{ст}) = q_1 - q_2, \quad (4.31)$$

т.е. теплота, аккумулированная смесью (в безразмерном виде) равна разности тепловыделения в результате реакции и теплоотвода к стенкам сосуда.

Рассмотрим взаимное расположение двух функций $q_1(\theta)$, $q_2(\theta)$ (рис.4.2).

Первая из них вначале растет очень медленно, т.к. при малых θ экспонента весьма мала. Это означает, что реакция идет очень медленно, т.е. имеет место процесс окисления реагентов без горения. Однако при повышении температуры скорость реакции быстро увеличивается по закону Аррениуса.

После достижения максимума тепловыделения количество реагентов быстро уменьшается из-за выгорания смеси, а температура становится равной адиабатной температуре.

Кривые теплоотвода $q_2(\theta)$ при $\mu = const$ представляют собою прямые линии с углом наклона к оси θ пропорциональным теплоотводу.

Пусть при определенном μ_1 прямая теплоотвода пересекает $q_1(\theta)$ в трех точках (1,2,3). Устойчивой является точка 1. Выше ее (между 1 и 2) теплоотвод превышает тепловыделение и, следовательно, самостоятельно система не может перейти в точку 2, где система неустойчива. Малейшее отклонение от точки 2 переводит систему либо в точку 3, при высоком тепловыделении и горении, либо в точку 1, где происходит медленная реакция окисления с малым тепловыделением. Следовательно, единственным устойчивым положением системы является точка 1.

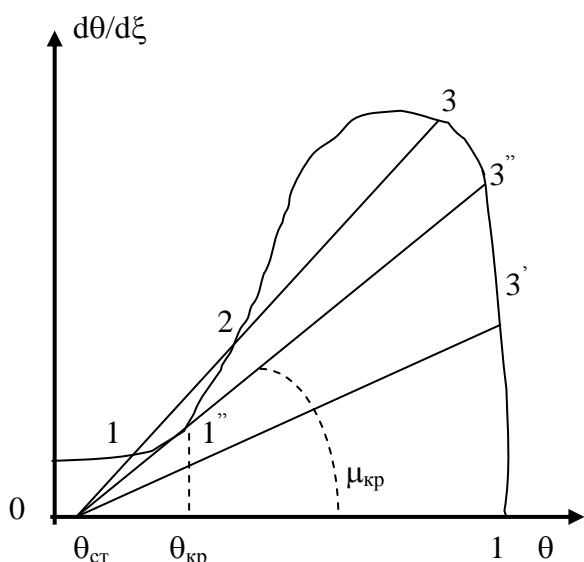


Рисунок 4.2 – Схема решения уравнения (4.32)

Пусть при ином $\mu_2 < \mu_1$ кривые тепловыделения и теплоотвода пересекаются в точке 3'. Эта точка характеризует единственное устойчивое положение системы, когда тепловыделение и теплоотвод равны, и соответствует максимальной температуре процесса, мало отличающейся от адиабатной. После достижения этой точки скорость тепловыделения падает (происходит догорание смеси) и смесь остывает до $\theta_{ст}$.

Граничным между первым и вторым случаем является условие касания кривой тепловыделения и теплоотвода в точке 1''. Отклонение влево от точки приводит к превышению тепловыделения над теплоотводом и возвращает систему в ту же точку. Отклонение вправо приводит систему к

воспламенению и горению до точки 3", которая характеризует максимальную температуру процесса. Таким образом, касание кривых тепловыделения и теплоотвода можно принять за условие воспламенения, а угол наклона $q_2(\theta)$ при этом определить как $\mu_{кр}$. Если пренебречь выгоранием смеси до воспламенения, то можно сформулировать математические условия воспламенения

$$q_1 = q_2, \quad (1 - \theta_0) e^{-Arr/\theta_{кр}} = \mu_{кр} (\theta_{кр} - \theta_{ст}),$$

$$\frac{dq_1}{d\theta} = \frac{dq_2}{d\theta}, \quad \frac{Arr(1 - \theta_0) e^{-Arr/\theta_{кр}}}{\theta_{кр}^2} = \mu_{кр}. \quad (4.32)$$

Из решения системы (4.32) получим

$$\theta_{кр} = 0,5Arr(1 - \sqrt{1 - 4\theta_{ст}/Arr}) \approx \theta_{ст} + \theta_{ст}^2/Arr, \quad (4.33)$$

где учтено, что $4\theta_{ст}/Arr \ll 1$, и корень квадратный разлагается в ряд с учетом 3-х членов ряда. Подставив (4.33) в (4.32) можно определить $\mu_{кр}$ и предварительный относительный разогрев смеси перед воспламенением

$$(\theta_{кр} - \theta_{ст})/\theta_{ст} = \theta_{ст}/Arr. \quad (4.34)$$

Однако, исследование системы (4.32) на ЭВМ с учетом выгорания топлива за период индукции показало, что значение критического теплоотвода с учетом выгорания топлива получается существенно ниже, чем без учета выгорания. Поэтому условием самовоспламенения при наличии теплоотвода к стенкам сосуда можно принять

$$\mu \leq \mu_{кр}, \quad (4.35)$$

где критическое значение теплоотвода определяется как

$$\mu_{кр} = 10 \cdot \exp(-0,9Arr/\theta_0) \quad (4.36)$$

Длительность периода индукции при $\mu/\mu_{кр} \geq 0,12$ составляет

$$\xi_{ад}/\xi_T = 1,08 - 0,68\mu/\mu_{кр}, \quad (4.37)$$

где $\xi_{ад}$ определяется по (4.22).

Максимальная температура процесса горения также зависит от теплоотвода и может быть определена (при $0 \leq \mu/\mu_{кр} \leq 0,9$) из соотношения

$$\theta_{max} = 1 - 0,45 \frac{\theta_0}{Arr} \left(\frac{\mu}{\mu_{кр}} \right)^{1,2} \quad (4.38)$$

Полученные соотношения позволяют рассчитать основные параметры горения газовых смесей.

Вопросы для самопроверки

1. Запишите уравнение теплового баланса при воспламенении гомогенной смеси в объеме с учетом теплоотвода к стенкам.

2. Представьте упрощенную графическую интерпретацию решения этого уравнения.

3. Сформулируйте условие воспламенения гомогенной смеси при теплоотводе к стенкам.

4.2.5. Распространение пламени в газовых смесях

До сих пор рассматривалось горение неподвижной смеси, заполняющей некоторый объем. В практике обычно горение имеет место в движущемся через камеру сгорания газе. Поэтому введем некоторые новые понятия.

Рассмотрим трубку, заполненную гомогенной горючей смесью. Предположим, что с одного конца трубки смесь воспламеняется. Зона горения (зона пламени) представляет собою тонкий слой, отделяющий исходную смесь от продуктов сгорания (в силу малости времени горения, см. (4.25)). Вследствие разности температуры между зоной горения и исходной смесью возникает тепловой поток от зоны горения к исходной смеси, который нагревает ее и смесь воспламеняется. Фронт пламени начинает перемещаться в сторону исходной смеси.

Скоростью распространения фронта пламени (U_{ϕ}) называют видимую скорость движения фронта пламени относительно исходной смеси.

Нормальной скоростью распространения пламени (U_n) называют скорость движения фронта пламени относительно исходной смеси, направленную по нормали к поверхности фронта пламени в данной точке.

Для плоского фронта пламени $U_{\phi} = U_n$.

При движении фронта пламени по трубке в силу неравномерности скорости потока по сечению и теплоотвода к стенке трубки конфигурация фронта пламени искривляется, и

$$U_{\phi} \cdot \pi R^2 = U_n F, \quad U_{\phi} = U_n F / \pi R^2, \quad (4.39)$$

где F – поверхность фронта пламени.

Для исследования закономерностей нормального распространения фронта пламени рассмотрим плоский фронт пламени в трубке сечением F , периметром U , заполненной однородной горючей смесью. Примем, что исходная смесь движется навстречу фронту со скоростью U_n . Тогда фронт пламени остается неподвижным.

Выберем в зоне горения элементарный объем dV , длиной по оси x равный dx и составим тепловой и материальный балансы этого объема.

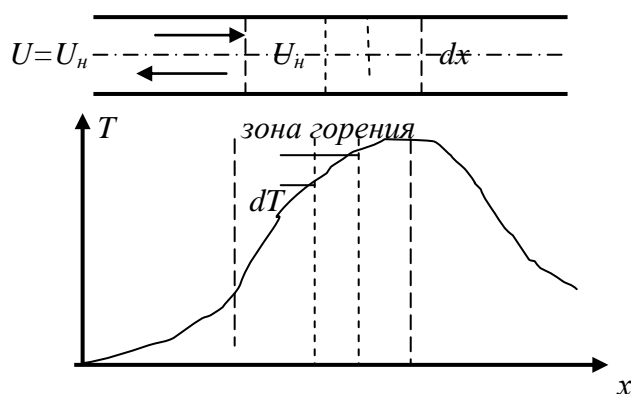


Рисунок 4.3 – К уравнению теплового баланса горения в потоке

В элементе выделяется теплота химической реакции

$$dQ_1 = Q_p k_0 C e^{-E/RT} dV, \quad (4.40)$$

в предположении первого порядка реакции, и подводится теплота теплопроводностью от более горячих слоев

$$dQ_2 = \lambda F \frac{d^2 T}{dx^2} dx. \quad (4.41)$$

Из элемента теплота уносится потоком газа и теплообменом со стенкой

$$dQ_3 = U_H F \rho c_p dT, \quad (4.42)$$

$$dQ_4 = \alpha U (T - T_{ct}) dx \quad (4.43)$$

Суммируя (4.40 – 4.43), получим

$$Q_p k_0 C e^{-E/(RT)} dV + \lambda F \frac{d^2 T}{dx^2} dx - U_H F \rho c_p dT - \alpha U (T - T_{ct}) dx = 0 \quad (4.44)$$

Материальный баланс складывается из внесения массы в элемент за счет диффузии

$$dM_1 = D \frac{d^2 C}{dx^2} dx, \quad (4.45)$$

уноса вещества из объема потоком газа

$$dM_2 = U_H dC, \quad (4.46)$$

расхода вещества за счет реакции горения

$$dM_3 = k_0 C e^{-E/(RT)} dx. \quad (4.47)$$

В итоге получим

$$D \frac{d^2 C}{dx^2} dx - U_H dC - k_0 C e^{-E/(RT)} dx = 0. \quad (4.48)$$

С краевыми условиями:

$$x \rightarrow -\infty \quad T = T_0, \quad C = C_0, \quad dT/dx = dC/dx = 0, \quad (4.49)$$

$$x \rightarrow +\infty \quad T = T_{ct}, \quad C = 0, \quad dT/dx = dC/dx = 0. \quad (4.50)$$

Для приведения уравнений (4.44) и (4.48) к безразмерному виду используем введенные ранее θ и σ , и обозначим новые комплексы как

$$\tau = \frac{x k_0}{U_H}, \quad \mu = \frac{\alpha U_H}{F \rho c_p k_0}, \quad Pe = \frac{U_H^2 c_p \rho}{k_0 \lambda}, \quad Pe_D = \frac{U_H^2}{k_0 D}. \quad (4.51)$$

Получаем систему уравнений

$$\frac{d\theta}{d\tau} = \frac{1}{Pe} \frac{d^2 \theta}{d\tau^2} - (1 - \theta_0) \sigma e^{-A\tau/\theta} - \mu(\theta - \theta_{ct}), \quad (4.52)$$

$$\frac{d\sigma}{d\tau} = \frac{1}{Pe_D} \frac{d^2 \sigma}{d\tau^2} - \sigma e^{-A\tau/\theta}. \quad (4.53)$$

с граничными условиями:

$$\tau \rightarrow -\infty, \quad \theta = \theta_0, \quad \sigma = 1, \quad d\theta/d\tau = d\sigma/d\tau = 0, \quad (4.54)$$

$$\tau \rightarrow +\infty, \quad \theta = \theta_{ct}, \quad \sigma = 0, \quad d\theta/d\tau = d\sigma/d\tau = 0. \quad (4.55)$$

Система уравнений (4.52 – 4.53) не поддается точному решению. Однако решение этих уравнений имеют большое значение не только для теории горения, но также для практики расчета горелочных устройств. Поэтому рассмотрим вначале решение этой системы при отсутствии теплообмена. Тогда по Зельдовичу область интегрирования разбивается на 3 зоны: зона подогрева (до τ_1), где можно пренебречь выгоранием топлива; зона горения (от τ_1 до τ_2) и зона догорания. В зоне подогрева реакции горения отсутствуют и уравнение (4.52) упрощается до

$$d^2\theta/d\tau^2 = Pe(d\theta/d\tau) \quad (4.56)$$

и после интегрирования получается

$$d\theta/d\tau = Pe(\theta_b - \theta_0) \quad (4.57)$$

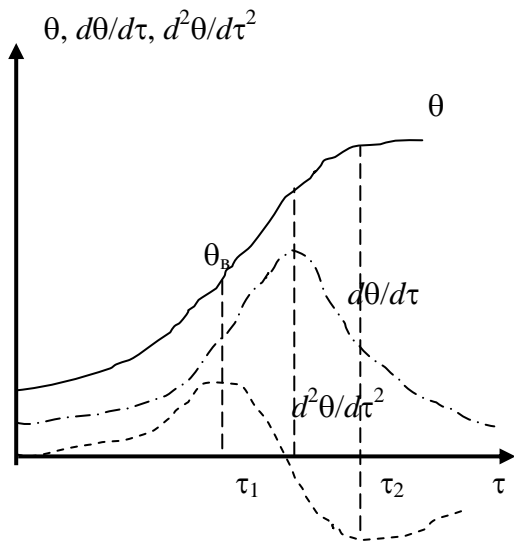


Рисунок 4.4 – К решению уравнения (4.52)

Решение этого уравнения дает

$$d\theta/d\tau = \sqrt{2Pe \int_{\theta_b}^1 f(\theta)d\theta}. \quad (4.59)$$

Исследования академика Колмогорова показали, что система уравнений (4.52-4.53) имеет решение, удовлетворяющее граничным условиям, только при определенном значении критерия Pe . Поэтому из условия равенства производных для первой и второй зон можно определить искомый критерий Pe . Получим

$$Pe = 2 \int_{\theta_0}^1 f(\theta)d\theta / (1 - \theta_0)^2, \quad (4.60)$$

или в размерном виде для реакции первого порядка

$$U_H = \frac{RT_a}{E} \sqrt{\frac{2\lambda k_0 (T_a - T_0)}{Q_p C_0}} e^{-A/T_a}. \quad (4.61)$$

Однако, полученное соотношение приближенно из-за специфического поведения производных функции θ . Сплошной линией (рис.4.5) показано точное численное решение, из которого видно, что угол наклона производной соответствует нормальной скорости распространения пламени. Приближенное решение показывает, что производная в первой зоне постоянна и максимальна.

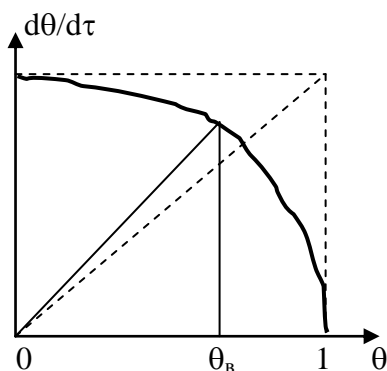


Рисунок 4.5 – Точное и приближенное решение (4.58)

Сопряжение происходит в точке $\theta = 1$. Чем больше в действительности точка θ_b смещена от 1, тем больше погрешность решения.

Проведенное численное интегрирование уравнений (4.52 – 4.53) на ЭВМ позволило предложить для определения критерия Pe следующую зависимость

$$Re_a = 5,35 \cdot 10^{-2} \theta_0^5 e^{-1,5A_{гр}}, \quad (4.62)$$

или скорость распространения фронта пламени получается в виде

$$U_{н.а} = 0,23 \sqrt{a \cdot k_0 \theta_0^5 e^{-1,5A_{гр}}}. \quad (4.63)$$

Наличие теплоотвода существенно изменяет характер распространения пламени. Опыты показывают, что увеличение диаметра трубки до определенного предела увеличивает скорость распространения фронта пламени. Если уменьшать диаметр трубки, то скорость распространения фронта пламени также уменьшается, пока при некотором диаметре пламя вообще прекращает распространяться по трубке. Наличие теплоотвода приводит к тому, что скорость горения падает по радиусу трубки и на стенке практически равна 0, т.е. имеется некоторая область трубки, где горение отсутствует. Уменьшение диаметра приводит к тому, что все сечение заполнено не горящим газом. Решение системы (4.53) на ЭВМ с учетом теплоотвода приводит к следующей зависимости скорости фронта от теплоотвода

$$Re_T / Re_a = 0,365 + 0,635 e^{-2,5\mu/\mu_{кр}} \quad (4.64)$$

где $\mu_{кр}$ определяется по (4.36).

Приведенные соотношения позволяют рассчитать все параметры горения потока газовых смесей.

Вопросы для самопроверки

1. *Дайте определение понятиям: скорость распространения фронта пламени, нормальная скорость распространения фронта пламени.*

2. *Как связаны скорость распространения фронта пламени и нормальная скорость распространения фронта пламени?*

3. *Запишите уравнение теплового баланса горения при движении газовой смеси по трубке.*

4. *Запишите уравнение материального баланса для этого же случая.*

5. *От каких параметров зависит скорость распространения фронта пламени (плоского)?*

6. *Как влияет теплоотвод на скорость распространения фронта пламени.*

5. ДИФФУЗИЯ И МАССООБМЕН

Как говорилось ранее, процесс горения складывается из двух стадий: подвода окислителя и отвода продуктов сгорания (физический этап) и протекания химической реакции (химический этап). Рассмотрим подробнее физический этап процесса горения.

Пусть имеется смесь двух различных газов при общем постоянном давлении P , но с наличием градиента парциального давления p_1 и p_2 (концентраций C_1 и C_2). Тогда тепловое движение молекул из-за различия концентраций компонент приведет к возникновению потоков массы. Согласно закона Фика, при постоянном полном давлении смеси потоки массы компонент в бинарной смеси определяются как

$$g_1 = -D_{12} \frac{dC_1}{dx} = -g_2 = D_{21} \frac{dC_2}{dx}, \quad (5.1)$$

где $D_{12} = D_{21}$ – коэффициенты взаимной диффузии по концентрации. Если

C [моль/м³], то при g [моль/м² с] коэффициент диффузии D [м²/с].

В общем случае коэффициенты диффузии зависят от температуры и давления смеси и определяются как

$$D_{12} = D_{012}(P_0/P)(T/T_0)^{1,5}, \quad (5.2)$$

где P_0, T_0 – нормальные условия.

Таблица 5.1 – Коэффициенты диффузии

Компоненты	D_{012} [см ² /с]
Кислород – воздух	0,178
Кислород – окись углерода	0,185
Углекислый газ – воздух	0,138
Кислород – азот	0,187
Водяной пар – воздух	0,22

Коэффициенты D_{012} (табл.5.1) определены экспериментально

Если компоненты бинарной смеси считать идеальными газами, то (5.1) можно записать

$$-\frac{D_{12}}{RT} \frac{dp_1}{dx} = \frac{D_{21}}{RT} \frac{dp_2}{dx}. \quad (5.3)$$

Соотношения для диффузионных потоков усложняются, если в системе протекают процессы, связанные с изменением объема газовой среды. При гетерогенных реакциях (горение углерода, конденсация пара из парогазовой среды и т.д.) появляется дополнительный молярный перенос массы, компенсирующий диффузионный перенос инертного компонента по направлению к полупроницаемой поверхности, т.н. Стефанов поток. Следовательно, общий поток массы любого компонента запишется в виде:

$$g_i = g_{iD} + w_c p_i / RT, \quad (5.4)$$

где w_c – скорость Стефанового потока, которая может быть найдена из условия отсутствия потока массы инертного компонента на полупроницаемой поверхности; g_{iD} – диффузионный поток.

При гетерогенном горении молекулярная диффузия (как и теплопроводность) осуществляется только в ламинарном пограничном подслое у поверхности. При расчете теплообмена используется гипотеза Ньютона в виде $q = \alpha \Delta T$. Для расчета диффузионного массообмена у поверхности твердого тела вводится аналогичное соотношение в виде

$$g = \alpha_D \Delta C = \frac{\alpha_D}{RT} \Delta p, \quad (5.5)$$

где α_D – коэффициент массоотдачи; ΔC – разность концентраций компонента в потоке и у поверхности; Δp – разность парциальных давлений. Величина α_D (как и α) зависит от большого числа факторов и, в силу подобия системы уравнений, описывающих процесс теплообмена и массообмена, может быть найдена (в первом приближении) из критериальных уравнений конвективного теплообмена, при замене в них критерия Pr на $Pr_D = \nu/D$ и критерия Nu на $Nu_D = \alpha_D L/D$. В частности, для массообмена сферической частицы в потоке воздуха можно использовать уравнение

$$Nu_D = 2 + 0,16 Re^{2/3} Pr_D^{0,3}. \quad (5.6)$$

Аналогия между теплообменом и массообменом не является полной, прежде всего из-за наличия Стефанового потока массы. Для точных расчетов массообмена следует использовать данные экспериментальных исследований.

Вопросы для самопроверки

1. Как определяется плотность потока массы по закону Фика?
2. Что является движущей силой диффузионного переноса массы?
3. От чего зависит коэффициент диффузии?
4. Какой процесс переноса массы называют массоотдачей?

6. ГОРЕНИЕ УГЛЕРОДА

6.1. Механизм выгорания углерода

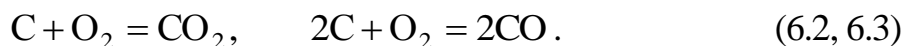
Твердое натуральное топливо, содержащее углерод, влагу, углеводородные соединения и золу, при попадании в топочную камеру нагревается и выделяет влагу и летучие соединения. В результате остается твердый остаток, состоящий из углерода и золы. Выделение летучих оказывает влияние на воспламенение топлива, т.к. это достаточно быстрый процесс. При этом выделяется только около 10% тепла. Основное тепловыделение приходится на углерод коксового остатка. Поэтому закономерности горения углерода определяют процесс выгорания коксовых частиц.

Горение углерода – гетерогенный процесс, определяемый как кинетикой химических реакций, так и диффузионным переносом кислорода и продуктов сгорания в пограничном слое у поверхности частицы. Кроме того, на поверхности углеродной частицы происходит процесс адсорбции кислорода с образованием нестабильных химических соединений (хемосорбция). В дальнейшем эти соединения распадаются с выделением в газовую среду CO и CO₂. При низкотемпературном процессе (600 ÷ 800°C) основную роль играют процессы хемосорбции и происходит процесс окисления топлива с малой скоростью реакции. В диапазоне топочных температур (1400 ÷ 1800°C) сорбционные процессы протекают практически мгновенно и можно считать, что количество окислителя, поглощенное топливом, соответствует стехиометрии реакций окисления. При этом скорость выгорания углерода по опытным данным может быть представлена в виде

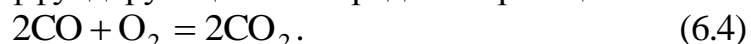
$$W = k C, \quad (6.1)$$

где C – концентрация окислителя у поверхности углеродной частицы; k – видимая (опытная) константа гетерогенной реакции.

Независимо от механизма горения углерода первичными реакциями взаимодействия топлива и окислителя являются



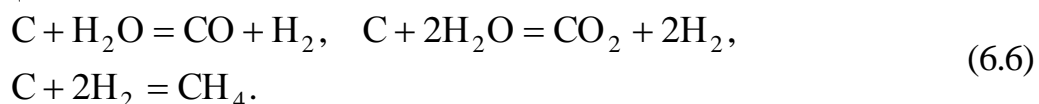
Наряду с этими реакциями у поверхности углеродной частицы возможно взаимодействие окиси углерода с диффундирующим кислородом по реакции



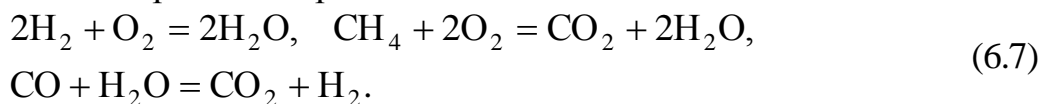
и на поверхности частицы восстановление углекислоты за счет углерода по реакции



При наличии в топочном объеме водяного пара может происходить окисление углерода по реакциям



а у поверхности частицы происходят реакции



Эти реакции принято называть вторичными. Каждая из этих реакций имеет свой тепловой эффект и энергию активации. В зависимости от условий определяющее влияние на процесс выгорания частицы могут оказывать как первичные, так и вторичные реакции. Кроме того, при «мокрой» газификации (наличие водяного пара) реакции могут протекать с участием активных центров, что уменьшает энергию активации, и повышает скорость выгорания коксовой частицы. Будем рассматривать в дальнейшем только «сухую» газификацию коксовой частицы, когда H_2O в топочном объеме отсутствует. Тогда набор реакций, определяющий процесс выгорания частицы будет

1. $\text{C} + \text{O}_2 = \text{CO}_2 + 394$ [МДж/моль]
2. $2\text{C} + \text{O}_2 = 2\text{CO} + 219$ [МДж/моль]
3. $\text{C} + \text{CO}_2 = 2\text{CO} - 186$ [МДж/моль]
4. $2\text{CO} + \text{O}_2 = 2\text{CO}_2 + 570$ [МДж/моль]

Рассматривая высокотемпературное горение, примем для скорости гетерогенной реакции уравнение (6.1), и будем считать, что константа скорости зависит от температуры по закону Аррениуса. Тогда для каждой реакции будет справедливо соотношение

$$dG_i = k_0 C_i e^{-E_i/(RT)}, \quad (6.8)$$

где G_i – количество реагирующего вещества (моль/(m^2s) – для гетерогенной и моль/(m^3s) – для гомогенной реакции); C_i – действующая концентрация газовой компоненты (моль/ m^3); E_i – энергия активации данной реакции; k_0 – постоянная скорости реакции (м/с – для гетерогенной и с^{-1} – для гомогенной реакции). Исследование реакции (4) показали, что ее скорость определяется концентрацией CO , и только при малой концентрации кислорода зависит от его содержания.

Сопоставление опытных данных по кинетике взаимодействия углерода различных топлив с кислородом показало, что при повышении температуры линии $\lg(k) = f(1/T)$ пересекаются в некоторой точке т.н. «полюсе». Введение такой точки с координатами k^* , T^* позволило связать энергию активации и константу скорости реакции в виде

$$k_i = k^* \exp\left[-\frac{E_i}{RT}\left(1 - \frac{T}{T^*}\right)\right]. \quad (6.9)$$

Основываясь на значениях координат полюса, можно связать энергию активации и k_0 . Если принять в качестве координат полюса данные Шестакова ($k^* = 100$ м/с; $T^* = 2600$ К), то эта связь имеет вид

$$\lg(k_0) = 0,02 E + 2, \quad (6.10)$$

где E [МДж/моль] – энергия активации. Для реакции (1) ее значение для кокса различных топлив приведено в табл. 6.1.

Исследования различных авторов показали, что существует связь для одного и того же кокса между энергиями активации реакций (1) и (2,3) в виде $E_{(2)} / E_{(1)} = 1,1$;

$$E_{(3)} / E_{(1)} = 2,2.$$

Таблица 6.1 – $E_{(1)}$ для различных топлив

Марка угля	$E_{(1)}$ МДж/моль
Древесный уголь	80
Торф	85
Бурый уголь	100
Каменный уголь	120
Антрацит	155

Использование приведенных выше данных для практических расчетов дает достаточно удовлетворительные результаты.

Таким образом, зная энергию активации только для одной реакции окисления углерода коксового остатка, можно

определить как константы, так и энергию активации для остальных реакций.

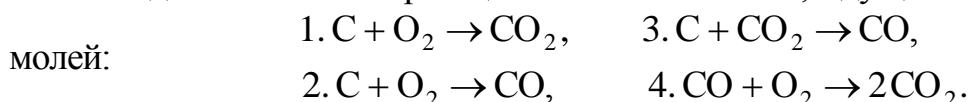
Вопросы для самопроверки

1. Какие существуют этапы взаимодействия окислителя и углерода топлива?
2. Запишите реакции «сухой» газификации углерода.
3. Запишите реакции «мокрой» газификации углерода.
4. Запишите и поясните условную скорость гетерогенной реакции.
5. Как связаны энергия активации и постоянная скорости гетерогенной реакции?

6.2. Теория «приведенной пленки»

При горении углерода кислород расходуется на поверхности частицы и непрерывно подводится из окружающего объема. Продукты окисления (горения) непрерывно отводятся от поверхности частицы в топочный объем. Таким образом, химический процесс горения (окисления) сопровождается физическим процессом встречной диффузии кислорода и продуктов сгорания у поверхности углеродного массива. Следствием этих процессов является установление определенного распределения концентрации компонентов газовой смеси у поверхности углеродной частицы. Процессы, происходящие в пограничном слое у поверхности частицы, наиболее просто учитываются методом «приведенной пленки». Будем считать, что в ядре потока из-за интенсивного турбулентного переноса вещества концентрации компонентов выровнены до некоторых средних значений. В пограничном слое у поверхности частицы перенос массы осуществляется только молекулярной диффузией. Рассматривая реакции «сухой газификации» отметим, что реакции (2,3 и 4) протекают с изменением числа молей и, следовательно, должен иметь место Стефанов поток массы в пограничном слое, что существенно усложняет расчеты.

Поэтому в дальнейшем будем пренебрегать изменением числа молей, и заменим действительные реакции гипотетическими, идущими без изменения числа



Плотность потока массы некоторого компонента через «приведенную пленку» будет

$$g_i = \alpha_D (C_{in} - C_{iоб}), \quad (6.11)$$

или, предполагая линейное изменение концентрации в пленке,

$$g_i = D \Delta C / \Delta. \quad (6.12)$$

Приравнявая эти потоки, получаем

$$\Delta / l = D / (\alpha_D l) = 1 / \text{Nu}_D, \quad (6.13)$$

где l – характерный размер углеродной частицы; Nu_D – диффузионный критерий Нуссельта.

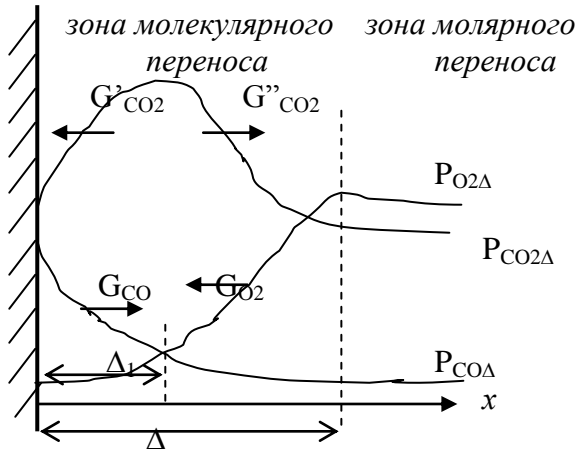


Рисунок 6.1 – Пограничный слой у поверхности углеродной частицы

По данным различных авторов, при горении углеродной частицы стационарное состояние пограничного слоя наступает достаточно быстро (время установления этого состояния $\approx 1\%$ общего времени выгорания частицы). Поэтому считаем, что на поверхности углеродной частицы кислород расходуется на реакции (1, 2), а в объеме расходуется на выгорание окиси углерода. При этом скорость гомогенной реакции (4) определяется концентрацией компоненты, находящейся в недостатке.

Тогда у поверхности частицы, где концентрация O_2 меньше, чем CO , скорость реакции зависит от концентрации O_2 , а у внешней границы пленки – от концентрации CO . Обозначим индексами компоненты: 1 – O_2 , 2 – CO_2 , 3 – CO . Баланс потоков массы в зоне $x \leq \Delta_1$ для элемента объема dx будет записан в виде (с учетом стехиометрии реакции 4)

$$dG_1 = -2dG_2 = dG_3 = -k_4 \frac{p_1}{RT} dx = -\frac{D}{RT} \frac{d^2 p_1}{dx^2} dx. \quad (6.14)$$

Получаем уравнение

$$p_1'' - p_1 k_4 / D = 0, \quad (6.15)$$

решение которого позволяет найти распределение парциального давления кислорода в зоне $x \leq \Delta_1$. Приведя уравнение (6.15) к безразмерному виду, получим комплекс (обобщенную переменную)

$$\text{Se} = \sqrt{k_4 \Delta^2 / D} = \sqrt{k_4 D} / \alpha_D, \quad (6.16)$$

критерий Семенова. Физический смысл этого критерия – мера отношения потока массы кислорода, который расходуется на гомогенную реакцию (4), к общему потоку массы, переданному диффузией.

Решение уравнения (6.14) при граничных условиях

$$x = 0 \quad p_1 = p_{10}; \quad x = \Delta_1 \quad p_1 = p_{1\Delta_1}, \quad (6.17)$$

позволяет найти распределение давления O_2 в зоне $x \leq \Delta_1$ и поток кислорода в этой зоне. Учитывая, что на поверхности частицы ($x = 0$) кислород расходуется по реакциям (1,2) с соответствующими константами скорости, можно определить парциальное давление кислорода на поверхности частицы.

Однако трансцендентность и громоздкость получаемых соотношений

затрудняет их использование для практических расчетов. Поэтому рассмотрим отдельные случаи горения углеродной частицы в зависимости от критерия Семенова.

При малом значении критерия Семенова ($Se \leq 0,4$) горением CO в пределах «приведенной пленки» можно пренебречь. Такой случай горения углеродной частицы называют схемой с **не горящим пограничным слоем**. Он имеет место при горении мелких угольных частиц и умеренной температуре в топочном объеме ($1200 \div 1400$ °С).

Если критерий Семенова велик ($Se \geq 2$), то кислород не достигает поверхности углеродной частицы, полностью расходуясь на выгорание CO в «приведенной пленке». Выгорание углерода происходит по реакции (3). Такую схему выгорания углеродной частицы называют схемой **двойного горящего пограничного слоя**. Подобная схема выгорания существует в условиях высокой температуры в топке (> 1800 °С) при слоевом сжигании крупных (> 10 мм) кусков топлива.

При умеренных значениях критерия Семенова ($0,4 \leq Se \leq 2$) имеет место рассмотренный ранее случай выгорания частицы топлива, называемый схемой **одинарного горящего пограничного слоя**. Эта схема выгорания коксовой частицы характерна для большинства слоевых топок ($\delta = 1 \div 10$ мм) при температуре в топке $\approx 1400 \div 1800$ °С.

Вопросы для самопроверки

1. В чем смысл введения понятия «приведенная пленка» при анализе горения коксовой частицы?

2. Запишите выражение критерия Семенова. Поясните его физический смысл.

3. Что такое «не горящий пограничный слой», «одинарный горящий» и «двойной горящий» слой?

6.3. Не горящий пограничный слой

В связи с тем, что при данной схеме выгорания углеродной частицы пренебрежимо мала скорость реакции горения CO в пограничном слое, потоки компонент через «приведенную пленку» постоянны, а, следовательно, распределение парциальных давлений в пленке линейное. Набор гипотетических реакций в этом случае состоит из



В этих условиях поток кислорода, проходящий через «приведенную пленку», расходуется на поверхности частицы по реакциям (1,2) с константами k_1 и k_2 . Получаем баланс потока кислорода

$$G_1 = -\frac{\alpha_D}{RT}(p_{1\Delta} - p_{10}) = -\frac{k_1}{RT}p_{10} - \frac{k_2}{RT}p_{10}, \quad (6.19)$$

откуда при известном парциальном давлении кислорода в топочном объеме $p_{1\Delta}$ находим p_{10}

$$p_{10} = p_{1\Delta} / (1 + N_1 + N_2), \quad (6.20)$$

где $N_i = k_i / \alpha_D$ – диффузионно-химические критерии подобия, представляющие собою меру отношения потока массы, поглощаемой реакцией, к ее диффузионному

потоку.

Поток углекислоты, образующейся на поверхности частицы по реакции (1) и поглощаемой по реакции (3), равен ее диффузионному потоку через «приведенную пленку». Получаем

$$G_2 = \frac{\alpha_D}{RT} (p_{20} - p_{2\Delta}) = \frac{k_1}{RT} p_{10} - \frac{k_3}{RT} p_{20}, \quad (6.21)$$

откуда парциальное давление углекислоты у поверхности частицы

$$p_{20} = \frac{[p_{2\Delta} + N_1 p_{1\Delta} / (1 + N_1 + N_2)]}{1 + N_3}, \quad (6.22)$$

и поток углекислоты через пленку

$$G_2 = \frac{\alpha_D}{RT} \frac{[p_{2\Delta} N_3 (1 + N_1 + N_2) - N_1 p_{1\Delta}]}{(1 + N_3)(1 + N_1 + N_2)}. \quad (6.23)$$

Если принять, что концентрация окиси углерода в топочном объеме пренебрежимо мала, то баланс потока CO через пленку представится в виде

$$G_3 = \frac{\alpha_D}{RT} p_{30} = \frac{k_2}{RT} p_{10} + \frac{k_3}{RT} p_{20}, \quad (6.24)$$

откуда парциальное давление окиси углерода у поверхности частицы

$$p_{30} = \frac{\{p_{2\Delta} N_3 (1 + N_1 + N_2) + p_{1\Delta} [N_2 (1 + N_3) + N_1 N_3]\}}{(1 + N_3)(1 + N_1 + N_2)}, \quad (6.25)$$

и поток окиси углерода через пленку

$$G_3 = \frac{2\alpha_D}{RT} \frac{\{p_{2\Delta} N_3 (1 + N_1 + N_2) + p_{1\Delta} [N_2 (1 + N_3) + N_1 N_3]\}}{(1 + N_3)(1 + N_1 + N_2)}. \quad (6.26)$$

Принятие гипотетических реакций, идущих без изменения объема, автоматически приводит к равенству молярных объемов кислорода и углерода, т.е.

$$G_C = G_2 + G_3 = -G_1. \quad (6.27)$$

В действительности по стехиометрическим соотношениям

$$-G_1 = G_2 + 0,5G_3. \quad (6.28)$$

Этим объясняется наличие коэффициента 2 в (6.26).

Удельный расход углерода с поверхности частицы по (6.28) с учетом (6.19) находится как

$$G_C = \frac{\alpha_D (N_1 + N_2) p_{1\Delta}}{RT(1 + N_1 + N_2)}. \quad (6.29)$$

Полученные соотношения позволяют рассчитать потоки компонент и распределение парциальных в «приведенной пленке», а также найти количество углерода, выгоревшего в единицу времени.

Проанализируем полученные результаты. Если N_1, N_2 и $N_3 \ll 1$, т. е. скорости химических реакций поглощения существенно ниже интенсивности диффузионного переноса массы через «приведенную пленку», то парциальное давление O_2 по всей пленке одинаково и равно $p_{1\Delta}$. Такое горение называют «кинетическим», т. к. поток кислорода определяется кинетикой реакций (1, 2). При $N_i \gg 1$ парциальное давление кислорода на поверхности частицы $p_{10} \rightarrow 0$ (интенсивность диффузионного переноса

мала, а скорости реакций (1,2) велики). Подобное горение называют «диффузионным», т.к. скорость выгорания углерода определяется интенсивностью диффузии кислорода через пленку. Тогда из (6.29) получаем

$$G_C = -G_1 = \alpha_D p_{1\Delta} / (RT). \quad (6.30)$$

Вопросы для самопроверки

1. Условие существования «не горящего» пограничного слоя.
2. Распределение парциальных давлений газовых компонент в «приведенной пленке».
3. Запишите баланс потока кислорода на поверхности коксовой частицы.
4. Запишите баланс потока углекислого газа на поверхности коксовой частицы.
5. Диффузионно-химические критерии подобия. Их физический смысл.
6. Предельные случаи «не горящего» слоя: кинетическое и диффузионное горение.
7. Скорость выгорания углерода при диффузионном горении.

6.4. Двойной горящий пограничный слой

Рассмотрим выгорание углеродной частицы по схеме двойного горящего пограничного слоя. При этом кислород не достигает поверхности углеродной частицы, полностью расходуясь на горение СО. «Приведенная пленка» может быть разделена на две области: окислительная, вблизи внешней границы пленки; восстановительная, вблизи поверхности частицы, где кислород отсутствует.

Рассмотрим простейший случай двойного горящего пограничного слоя при высокой скорости реакции горения СО и малой интенсивности диффузионного переноса массы. Тогда можно считать, что

$$Se = \sqrt{k_4 D} / \alpha_D \rightarrow \infty \quad (6.31)$$

В этом случае поток кислорода встречается с потоком СО на некоторой координате Δ_1 и полностью расходуется на горение СО. Выгорание углерода частицы происходит по восстановительной реакции (3). Учитывая, что реакции

$C + CO_2 = 2CO$ и $2CO + O_2 = 2CO_2$ могут быть заменены итоговой реакцией $C + O_2 = CO_2$, поток углекислоты, покидающий пленку, должен быть равен потоку кислорода, поступающему в пленку. Тогда, допустив, что парциальное давление CO_2 в топочном объеме пренебрежимо мало ($p_{2\Delta} \approx 0$), получим

$$\frac{D}{RT} \frac{p_{1\Delta}}{\Delta - \Delta_1} = \frac{D}{RT} \frac{p_{2M}}{\Delta - \Delta_1}, \quad (6.32)$$

где p_{2M} максимальная концентрация CO_2 , и окончательно $p_{1\Delta} = p_{2M}$.

Поток углекислоты у поверхности частицы

$$G_{20} = \frac{D}{RT\Delta_1} (p_{1\Delta} - p_{20}) = \frac{k_3}{RT} p_{20}, \quad (6.33)$$

и поток окиси углерода с учетом стехиометрии реакции

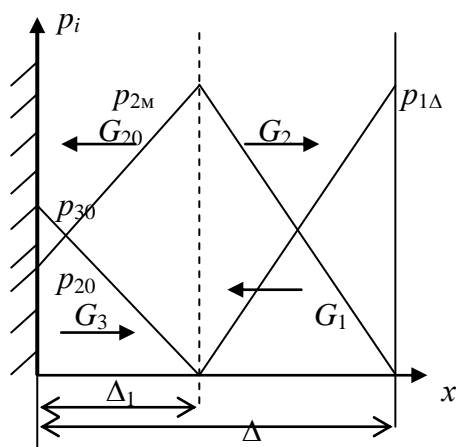


Рисунок 6.2 – Двойной горящий пограничный слой при $Se \rightarrow \infty$

$$G_{30} = \frac{D}{RT\Delta_1} p_{30} = 2 \frac{k_3}{RT} p_{20}. \quad (6.34)$$

Откуда парциальные давления CO_2 и CO у поверхности частицы

$$p_{20} = \frac{Dp_{1\Delta}/(\Delta_1 k_3)}{1 + D/(\Delta_1 k_3)}, \quad (6.35)$$

$$p_{30} = \frac{2p_{1\Delta}}{1 + D/(\Delta_1 k_3)}. \quad (6.36)$$

Согласно стехиометрии реакции, поток окиси углерода должен быть в 2 раза больше потока кислорода. Поэтому удвоим левую часть (6.32) и приравняем ее (6.34).

$$2 \frac{D}{RT} \frac{p_{1\Delta}}{(\Delta - \Delta_1)} = 2 \frac{k_3}{RT} p_{20}, \quad (6.37)$$

куда подставим (6.35), и после несложных преобразований имеем, учитывая, что $\alpha_D = D/\Delta$

$$\Delta_1 / \Delta = 0,5(1 - \alpha_D/k_3) = 0,5(1 - 1/N_3). \quad (6.38)$$

Проанализируем (6.38). Очевидно, что Δ_1 должно быть положительным и меньше Δ . Это может иметь место только при $N_3 > 1$. Если $N_3 \rightarrow 1$, то $\Delta_1 \rightarrow 0$ и область горения CO приближается к поверхности частицы. При $N_3 \rightarrow \infty$ $\Delta_1 = 0,5 \Delta$ имеет место диффузионная область горения, когда скорость реакции горения существенно выше скорости диффузионного переноса массы и процесс выгорания углеродной частицы определяется скоростью диффузии кислорода через пленку.

Поток углекислоты у поверхности частицы из (6.33) с учетом (6.35)

$$G_{20} = 2 \frac{\alpha_D}{RT} \frac{k_3}{(k_3 + \alpha_D)} p_{1\Delta}. \quad (6.39)$$

В этом случае количество выгоревшего углерода равно потоку углекислоты по реакции (3). Если горение протекает в диффузионной области ($k_3 \gg \alpha_D$), то из (6.39) получим

$$G_C = 2 \frac{\alpha_D}{RT} p_{1\Delta}. \quad (6.40)$$

Сопоставляя полученные результаты с данными окислительного горения в диффузионной области (для не горящего слоя по (6.30)), получаем, что скорость выгорания углерода в 2 раза выше при двойном горящем слое. Это объясняется сокращением в 2 раза пути диффузии кислорода при одинаковой интенсивности диффузионного переноса.

Для случая, когда концентрация CO_2 в топочном объеме конечна, относительная толщина восстановительной области получается в виде

$$\frac{\Delta_1}{\Delta} = \frac{p_{1\Delta} + p_{2\Delta}}{2p_{1\Delta} + p_{2\Delta}} \left(1 - \frac{p_{1\Delta}}{2p_{1\Delta} + p_{2\Delta}} \frac{1}{N_3} \right), \quad (6.41)$$

а условие существования двойного горящего слоя имеют вид

$$\frac{p_{1\Delta}}{2p_{1\Delta} + p_{2\Delta}} \frac{1}{N_3} < 1. \quad (6.42)$$

Если скорость горения СО конечна, то выражения для распределения парциальных давлений и потоков через пленку получаются весьма громоздкими. Более подробный анализ условий перехода от одинарного к двойному горящему слою приводит к следующему

$$1/Se + 1/(2N_3) \leq 1/2. \quad (6.43)$$

Рассмотрение случая горения топлива по схеме одинарного горящего слоя выходит за рамки нашего курса.

Вопросы для самопроверки

1. Условия существования двойного горящего слоя.
2. Реакции выгорания углерода в случае двойного горящего слоя.
3. Распределение парциальных давлений в «приведенной пленке» при $Se \rightarrow \infty$.
4. Соотношение «окислительной» и «восстановительной» областей в «приведенной пленке» при $Se \rightarrow \infty$.
5. Определение количества выгоревшего углерода.

6.5. Условия выгорания коксовой частицы

Используя полученные выше данные по выгоранию углерода, можно оценить условия и время выгорания коксовой частицы. Вопрос о температуре горячей коксовой частицы имеет большое значение при определении области горения, и рассматривался многими исследователями. На основании обобщения опытных данных можно рекомендовать для расчета превышения температуры частицы над температурой топочной среды зависимость

$$\Delta T = 0,206(1900 - T_r)^{0,74} \delta^{0,16} C_{O_2}, \quad (6.44)$$

где T_r – температура газов, К; δ – диаметр коксовой частицы, мм; C_{O_2} – концентрация кислорода, %.

Для невысоких концентраций кислорода (< 5%) и сравнительно крупных частиц ($\delta > 1$ мм) можно без большой ошибки пренебрегать превышением их температуры над температурой потока.

Обычно заранее известны средние размеры частиц топлива и параметры среды в топочной камере. На основании этих данных можно определить кинетические константы скоростей реакций и условия массообмена. За границу кинетической области с достаточной точностью можно принять условие

$$N_1 + N_2 \leq 0,1, \quad (6.45)$$

и считать, что диффузионное сопротивление практически отсутствует.

При высокотемпературном горении крупных частиц топлива существенно влияние диффузионного сопротивления, и если

$$\sum N_i > 10, \quad (6.46)$$

то можно считать, что процесс идет в диффузионной области.

Изменение размеров коксовой частицы в процессе горения можно найти из материального баланса (если принять шаровую форму частицы) в виде

$$\frac{\rho}{\mu_C} dV = -G_C F d\tau \quad \text{или} \quad \frac{\pi\delta^2}{2\mu_C} \rho d\delta = -G_C \pi\delta^2 d\tau, \quad (6.47)$$

где ρ – плотность частицы; μ_C – молекулярный вес углерода; δ – текущий диаметр частицы. Время выгорания частицы с начальным диаметром δ_0 получится в виде

$$\tau_B = -\frac{\rho}{2\mu_C} \int_{\delta_0}^0 d\delta / G_C, \quad (6.48)$$

где G_C – скорость выгорания углерода [моль/(м²с)]. Точное вычисление данного интеграла затруднено. Однако, для кинетической области горения, когда G_C не зависит от размера частицы, он легко вычисляется. Сложнее это вычисление для диффузионной и переходной областей, когда $G_C = f(\alpha_D)$. Для определения коэффициента массоотдачи необходимо иметь относительную скорость частицы в потоке газовой среды.

6.5.1. Относительное движение частиц в потоке

При расчете выгорания коксовой частицы в потоке газа необходимо иметь скорость движения частицы в газовом потоке для расчета интенсивности массообмена. Пренебрегая неизотермичностью процесса, будем считать, что относительная скорость частицы зависит от теплофизических характеристик газовой среды, формы и размера частицы. В случае стационарного движения частицы (исключая время разгона) скорость потока относительно частицы равна скорости витания и, пренебрегая силами инерции и давления, ее можно найти из уравнения движения, записанного в виде:

$$mg = m_0 g + c f \rho_0 w^2 / 2, \quad (6.49)$$

где m , m_0 – масса частицы и вытесненного ею газа; c – коэффициент сопротивления; f – миделевое (среднее) сечение частицы; ρ_0 – плотность среды. Принимая частицу шарообразной формы, получим $m_0 = \rho_0 \pi \delta^3 / 6$, $f = \pi \delta^2 / 4$, $m = \rho \pi \delta^3 / 6$, и из (6.49) скорость витания определится как

$$w_{\text{вит}} = \sqrt{\frac{4g(\rho - \rho_0)\delta}{3\rho_0 c}}. \quad (6.50)$$

Однако по (6.50) скорость витания можно определить только последовательным приближением, т.к. коэффициент сопротивления, в свою очередь, является функцией критерия Рейнольдса $c = A / \text{Re}^n$. Следует, очевидно, предварительно задаться коэффициентом сопротивления, определить по (6.50) скорость витания, рассчитать критерий Re и найти новое значение коэффициента сопротивления.

Если учесть, что $\text{Re}_\delta = w_{\text{вит}} \delta / \nu$, то, обозначив $c \cdot \text{Re}^2 = \text{Ki}^3$ (критерий Кирпичева), получим

$$\text{Ki} = \delta \sqrt[3]{\frac{4g(\rho - \rho_0)}{3\rho_0 \nu^2}}. \quad (6.51)$$

Обозначив $Re / Ki = Sch$ (критерий Шиллера), получим

$$Sch = w_{\text{вит}} \sqrt[3]{\frac{3\rho_0}{4g(\rho - \rho_0)v}}. \quad (6.52)$$

Для заданных условий в топочном объеме и параметров коксовой частицы критерий Кирпичева известная величина. Если известна (экспериментально найдена) зависимость критерия Шиллера от критерия Кирпичева, то скорость витания может быть определена без последовательных приближений. В практических расчетах можно использовать

$$Sch = \frac{Ki^2}{24(1 + Ki^{1.5}/36)}. \quad (6.53)$$

Для частиц неправильной формы с размерами a, b, c можно найти диаметр эквивалентного шара

$$\delta_{\text{эк}} = \sqrt[3]{6abc/\pi}. \quad (6.54)$$

Тогда скорость витания такой частицы

$$w = w_{\text{шар}} / \sqrt{K_{\text{ф}}}, \quad (6.55)$$

где коэффициент формы $K_{\text{ф}} = 2,5 \div 5$ в зависимости от формы частицы.

Вопросы для самопроверки

1. Каковы температурные условия горения коксовой частицы?
2. Как определяются режимы выгорания частицы (кинетический, диффузионный)?
3. Запишите дифференциальное уравнение баланса массы выгорающей частицы и определите время выгорания частицы.
4. Что такое «скорость витания», как она определяется?

7. ГОРЕНИЕ ЖИДКОГО ТОПЛИВА

Температура среды, где происходит горение жидкого топлива, как правило, достаточно высока ($1400 \div 1800^\circ\text{C}$), а температура испарения жидкого топлива не превышает 240°C . Поэтому жидкое топливо сгорает всегда в паровой фазе, т. е. вначале испаряется, а позже паровая фаза горит. Процесс испарения и горения могут идти и параллельно. В технических устройствах, использующих жидкое топливо, последнее вначале распыляется (диспергируется) с помощью специальных устройств (форсунок) в камере горения. Распыл всегда полидисперсен, поэтому мелкие фракции полностью испаряются, и пары топлива с воздухом (окислителем) образуют горючую газовую смесь. Крупные капли могут гореть в процессе испарения, т.е. окружают себя собственными факелами.

Как и в случае горения CO у поверхности углеродной частицы, для оценки влияния горения паров в пограничном слое у поверхности капли можно использовать критерий Семенова в виде

$$Se = \sqrt{kD}/\alpha_D, \quad (7.1)$$

где k – константа скорости горения паров. При малом значении критерия

Семенова ($Se < 0,4$) горением паров в пограничном слое можно пренебречь, тогда пары топлива выносятся в окружающий объем и сгорают в нем по законам газового горения. Если $Se \rightarrow \infty$, то горение чисто диффузионное, т.к. пары топлива внутри пограничного слоя встречаются с потоком окислителя и полностью сгорают. При этом температура достигает максимума ($T = T_r$) в области, прилегающей к внешней границе пограничного слоя.

Рассмотрим диффузионное горение капли жидкого топлива при $Se \rightarrow \infty$. При горении паров в пограничном слое температура поверхности капли испаряющегося топлива будет равна температуре кипения жидкости, т.к. отвод тепла внутрь капли сравнительно мал. К поверхности капли тепло подводится из зоны горения. Для этого теплового потока баланс теплоты, пренебрегая теплотой, затраченной на нагрев капли, можно записать в виде

$$q_1 = \lambda \frac{dT}{dx} = [r + c_{pp}(T - T_{кип})]g_{п}, \quad (7.2)$$

где q_1 – плотность теплового потока; $g_{п}$ – плотность потока пара; $T_{кип}$ – температура поверхности капли, равная температуре кипения. В (7.2) учтена теплота испарения и перегрева пара. Считая пограничный слой плоским, а плотность потока пара постоянной, получим

$$g_{п} = \frac{1}{\Delta} \int_{T_{кип}}^{T_r} \frac{\lambda dT}{r + c_{pp}(T - T_{кип})} = \frac{1}{\Delta} \Phi(T_r, T_{кип}) \quad (7.3)$$

В последнем выражении Δ – толщина пограничного слоя. Если принять теплофизические характеристики пара постоянными, интеграл в (7.3) легко вычисляется и поток пара получается равным

$$g_{п} = \frac{1}{\Delta} \frac{\lambda}{c_{pp}} \ln \frac{r/c_{pp} + (T_r - T_{кип})}{r/c_{pp}}. \quad (7.4)$$

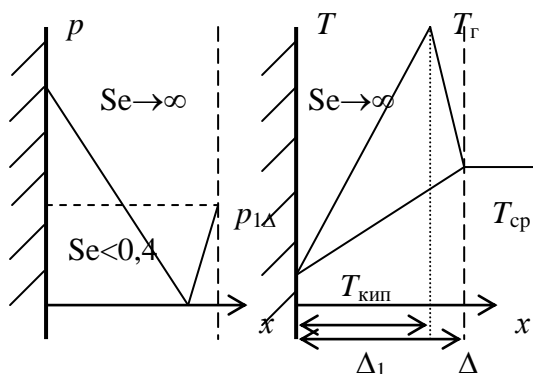


Рисунок 7.1 – Распределение парциальных давлений и температуры при горении капли жидкого топлива

Определение расхода пара требует значения температуры в зоне горения T_r . Для ее определения найдем тепловой поток, передаваемый в окружающую среду, пренебрегая теплотой на испарение топлива. Получим

$$q_2 = -\lambda dT/dx = g_{п} Q_r, \quad (7.5)$$

где Q_r – теплота горения топлива. В (7.5) не учтена теплота, затраченная на нагрев кислорода. Поток кислорода, поступающий в зону горения, связан с потоком пара стехиометрическим

коэффициентом горения и без учета Стефанового потока запишется как

$$g_{O_2} = -\frac{\mu_{O_2} D}{RT} \frac{dp_1}{dx} = -\beta g_{п}. \quad (7.6)$$

Из (7.5) и (7.6) получаем уравнение

$$-\frac{\lambda RT}{\mu_r D} dT = \frac{\mu_{O_2} Q_r}{\mu_r \beta} dp_1. \quad (7.7)$$

Т.к. при $Se \rightarrow \infty$ горение происходит в бесконечно тонком слое, то поток пара и кислорода к зоне горения постоянны и, следовательно, распределение парциального давления и температуры линейны. Тогда из (7.7) получаем

$$Le (T_r - T_c) = \frac{\mu_{O_2} Q_r P_{1c}}{\mu_r \beta c_p P} = T_a - T_c, \quad (7.8)$$

где P – полное давление; критерий Льюиса $Le = \lambda RT / (P \mu_r c_p D) = a/D$ полагаем не зависящим от температуры; T_a – температура адиабатного горения. Для газовой среды критерий Льюиса мало отличается от 1, тогда $T_r = T_a$. Учет лучистого теплообмена несколько снижает эту температуру, но, тем не менее, температура горения паров в пленке ≈ 3000 К.

Уравнение баланса массы испаряющейся и горячей по диффузионному механизму капли получается в виде

$$d\left(\rho_{ж} \frac{\pi \delta^3}{6}\right) = -\pi \delta^2 g_{п} d\tau, \quad (7.9)$$

где $\rho_{ж}$ – плотность жидкого топлива [$\text{кг}/\text{м}^3$], если плотность потока пара [$\text{кг}/(\text{м}^2\text{с})$], или $\rho_{ж}/\mu_{ж}$ – если плотность потока пара [$\text{моль}/(\text{м}^2\text{с})$]. С учетом (7.3) получается

$$\frac{d\delta}{d\tau} = -\frac{2\Phi(T_r, T_{кип})}{\Delta\rho_{ж}}, \quad (7.10)$$

или, учитывая, что $\Delta/\delta = 1/\text{Nu}_D$

$$\frac{d\delta^2}{d\tau} = -\frac{4}{\rho_{ж}} \text{Nu}_D \Phi(T_r, T_{кип}). \quad (7.11)$$

При постоянном критерии Нуссельта правая часть уравнения (7.11) постоянна. Тогда

$$\delta^2 = \delta_0^2 - K\tau, \quad (7.12)$$

где $K = 4 \text{Nu}_D \Phi(T_r, T_{кип}) / \rho_{ж}$ – коэффициент испарения. Уравнение (7.12) выражает закон Срезневского – линейную зависимость квадрата диаметра горячей по диффузионному механизму капли от времени.

По существу, полученные данные относятся к случаю достаточно больших скоростей обтекания капель. Однако даже в неподвижной среде ($\text{Nu}_D = 2$) порядок получаемых величин достаточно достоверен.

Вопросы для самопроверки

1. В чем особенности горения жидкого топлива?
2. Как оценить интенсивность горения паров топлива в пограничном слое?
3. Нарисуйте распределение парциальных давлений и температуры в пограничном слое капли при $Se \rightarrow \infty$.
4. Запишите баланс тепла, поступающего к поверхности капли топлива.
5. Определите из этого баланса поток паров топлива, уходящий с

поверхности капли.

6. Как определить температуру в зоне горения паров топлива.

7. Запишите баланс массы испаряющейся и горячей по диффузионному механизму капли жидкого топлива.

8. Сформулируйте и запишите закон Срезневского.

8. ГОРЕЛОЧНЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ СЖИГАНИЯ ГАЗООБРАЗНОГО ТОПЛИВА

Для протекания процесса горения газообразного топлива, как указывалось выше, необходимо обеспечить смешение топлива и воздуха, который используется как окислитель. Смешение топлива и воздуха производится в специальных устройствах, называемых газовыми горелками. Назначение газовых горелок состоит в смешении газообразного топлива и воздуха и подаче смеси в необходимом количестве и направлении в топочный объем.

В зависимости от того, каким образом организуется процесс смешения топлива и воздуха, газовые горелки можно классифицировать следующим образом.

- горелки с внешним смесеобразованием;
- горелки с частичным внутренним смесеобразованием;
- горелки с полным внутренним смесеобразованием.

Рассмотрим особенности конструкции и назначение основных типов горелочных устройств.

8.1. Горелки с внешним смесеобразованием

В горелках с внешним смесеобразованием топливо (газ) и окислитель (воздух) подаются в топочное пространство параллельно, не смешивающимися струями. Топливо и воздух смешиваются в самом топочном объеме. В связи с тем, что скорость распространения фронта пламени составляет несколько десятков сантиметров в секунду, а скорость вытекания газа и воздуха из устья горелки существенно выше, длина факела горящего газа в таких горелках самая большая из всех типов горелок и достигает $60 \div 80$ выходных диаметров горелки.

Классическим примером таких горелок является горелка типа «труба в трубе», разработанная институтом «Стальпроект» в основном для методических нагревательных печей. На рис. 8.1 приведены конструкции этих горелок.

Маркировка горелок содержит 3 буквы и число, обозначающее диаметр выходного сечения ($d_{\text{нач.}}$) в миллиметрах. Первая буква (Д) – означает, что горелка двухпроводная, т.е. к горелке подводятся два трубопровода один для газа, второй для воздуха; вторая (В или Н) – характеризует теплоту горения газа (высокую $20 \div 36$ МДж/м³ или низкую $4 \div 10$ МДж/м³); третья (М, С или Б) – означает производительность горелки (малая, средняя или большая).

Расчет горелок включает определение проходных сечений для газа и воздуха в зависимости от давления сред перед горелкой.

Однако на практике выбор горелки осуществляется по номограммам института «Стальпроект» (рис. 8.2 и 8.3) в зависимости от давления воздуха и требуемой производительности горелки.

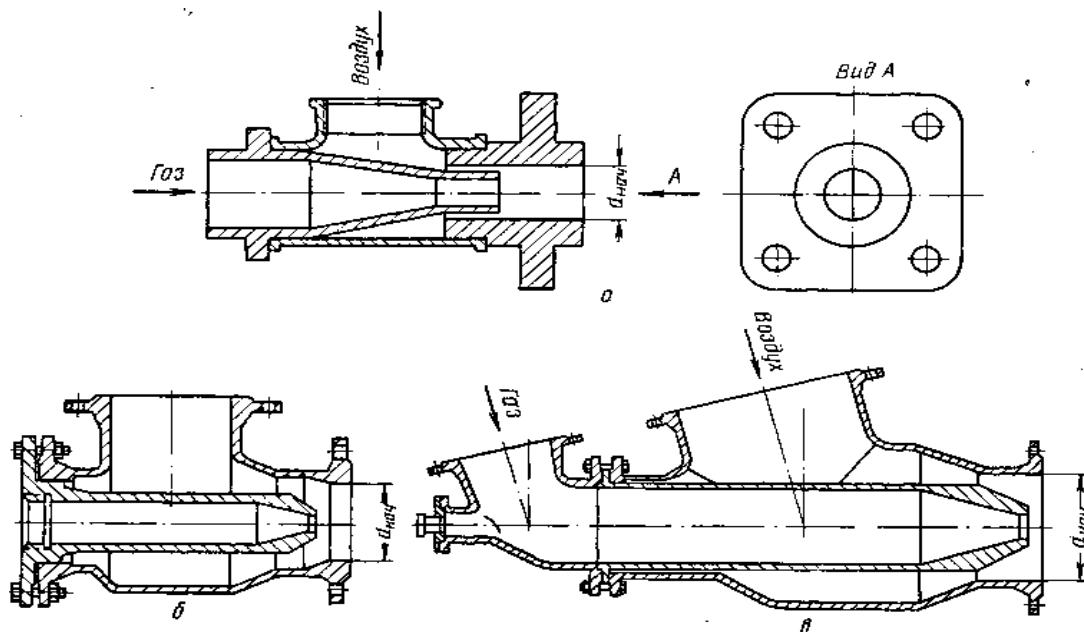


Рисунок 8.1 – Горелки типа «труба в трубе»
а – малой мощности; б – средней; в – большой.

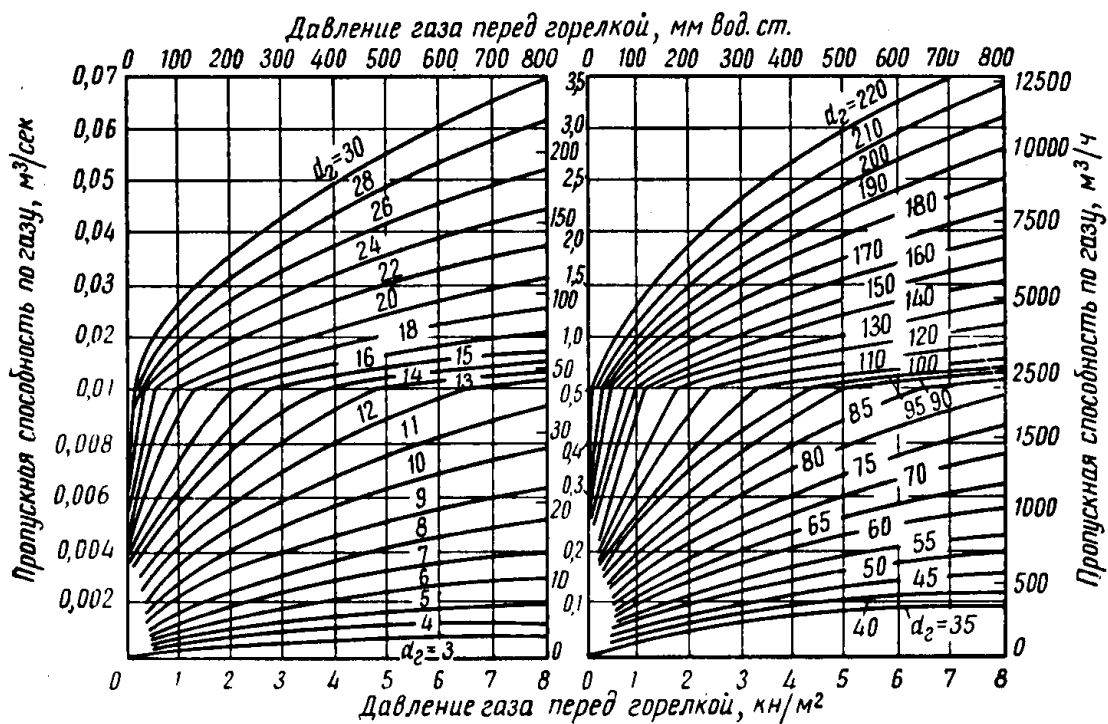


Рисунок 8.2 – Номограмма для выбора диаметра газового сопла горелок типа «труба в трубе»

Для использования номограммы должен быть задан состав топлива, его расход, коэффициент избытка воздуха, давление и температура газа и воздуха,

подаваемых в горелку. Номограммы построены для условной плотности газа $\rho_0=1\text{кг/м}^3$ и температуры 20°C . Рассчитывается плотность газа

$$\rho_r = \sum \mu_i X_i / 22,4, \quad (8.1)$$

где μ_i и X_i – соответственно молекулярный вес и объемная доля компонента газа. Если газ перед горелкой подогревается до температуры t_r , то определяется поправочный коэффициент

$$k_t = \sqrt{293/(t_r + 273)} \quad (8.2)$$

Расчетный расход газа находится как

$$V_{\text{рас.г}} = V_r \sqrt{\rho_r} / k_t \quad (8.3)$$

Из номограммы рис.8.2 по расчетному расходу газа и заданному давлению газа определяется диаметр газового сопла.

Типоразмер горелки определяется по номограмме рис.8.3 по расчетному расходу воздуха горения

$$V_{\text{в.расч.}} = V_v / k_t, \quad (8.4)$$

где k_t определяется по (8.2) для температуры подогрева воздуха, и давлению.

8.2. Горелки с частичным внутренним смесеобразованием

В горелках этого типа газ и воздух частично смешиваются в объеме самой горелки. Для этого используются различного рода смесители (турбулизаторы), встроенные в горелку. Перемешивание газа и воздуха горения способствует лучшему воспламенению и горению газа, поэтому длина факела пламени подобной горелки существенно меньше, чем горелок типа «труба в трубе», и составляет $10 \div 30$ выходных диаметров горелки.

Примером подобной горелки является разработанная институтом «Теплопроект» горелка ГНП, приведенная на рис.8.2.

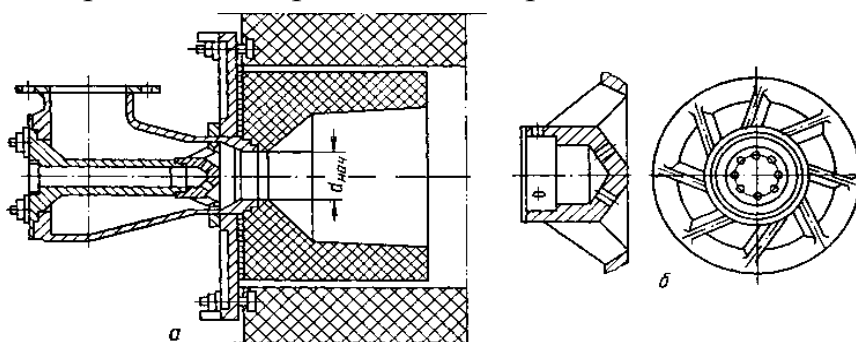


Рисунок 8.2 – Горелка типа ГНП
а – общий вид; б – многосопловой наконечник

Благодаря многосопловому турбулизатору поток газа разделяется на 8 струй, перемешивающихся с воздухом, поток которого турбулируется специальными лопастями. Перемешивание происходит частично в объеме горелки перед выходом из нее, а заканчивается в керамической чаше, расположенной

непосредственно за горелкой.

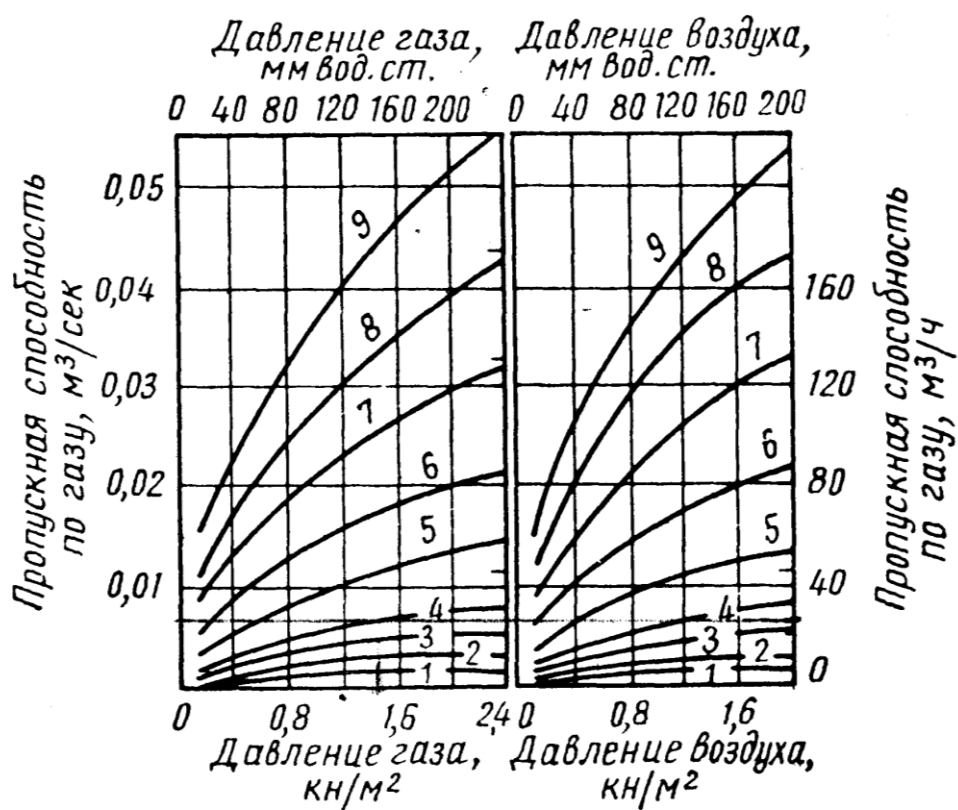


Рисунок 8.3 – Номограмма для выбора горелки ГНП

Горелки типа ГНП чаще всего используются в различных нагревательных печах проходного или камерного типа для нагрева металла перед чистовой прокаткой.

Выбор горелок этого типа производится также по номограммам, разработанным институтом «Теплопроект» в зависимости от давления газа и воздуха и требуемой производительности горелки. Номограммы приведены на рис. 8.3.

8.3. Горелки с полным внутренним смесеобразованием

Горелки этого типа чаще всего называют «инжекционными горелками», т.к. струя газа, вытекающая из газового сопла, инжектирует воздух горения. Горелки снабжаются камерой смешения, где происходит полное перемешивание газа и воздуха. Это обеспечивает минимальную длину факела, в связи с чем, эти горелки иногда называют «безфакельными». Наиболее широкое распространение подобные горелки нашли в бытовой газовой аппаратуре: горелки на газовых плитах, на бытовых водонагревателях.

В промышленности эти горелки широко применяются в нагревательных и термических печах, где требуется высокая равномерность распределения температуры по объему рабочего пространства, а также в печах для безокислительного нагрева металла. Одно из условий реформации природного

газа без сажеобразования (хорошее перемешивание газа и первичного воздуха горения) может быть реализовано только с помощью инжекционных горелок.

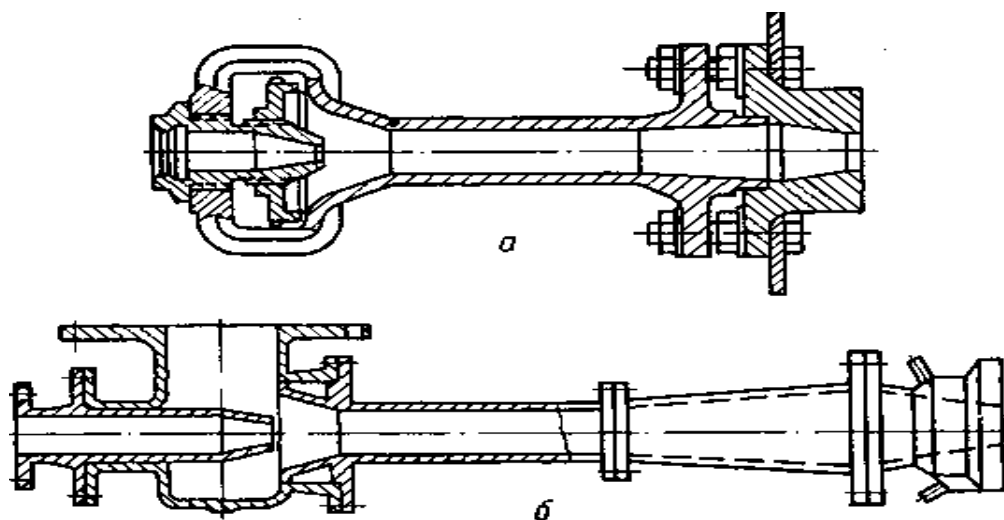


Рисунок 8.3 – Инжекционные горелки

а – однопроводная (атмосферная) горелка; б – двухпроводная горелка.

На рис. 8.3 приведены конструкции промышленных инжекционных горелок.

Однопроводные инжекционные горелки (тип а) применяются обычно в небольших камерных нагревательных печах, а так же в системах индивидуального газового отопления. Регулировка качества горения газа (избыток воздуха) осуществляется кольцевой шайбой на входе воздуха. Двухпроводные горелки (тип б) находят применение в термических и нагревательных печах. Работают эти горелки на повышенном давлении газа (до $2 \div 3$ бар), регулировка соотношения газ-воздух (избыток воздуха) осуществляется автоматическими регуляторами. Горелки имеют более длинную коническую камеру смешения, что позволяет получить большую скорость выхода газоздушной смеси из носика горелки. Из-за малой длины факела и достаточно высокой производительности горелки, выходная ее часть снабжена водоохлаждаемым наконечником.

Расчет этих горелок основан на методике расчета струйных аппаратов, и должен включать: расчет газового сопла на заданный расход газа; расчет коэффициента эжекции; расчет цилиндрической и конической камер смешения (их геометрические размеры); расчет выходного сечения горелки. Рассмотрение этих методик расчета выходит за рамки данного курса.

Практически выбор горелки производится по таблицам и номограммам завода-изготовителя или проектанта данных горелок.

9. ТОПОЧНЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ СЖИГАНИЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА

Сжигание твердого топлива осуществляется либо слоевым методом, когда топливо расположено на неподвижной или движущейся решетке, а воздух

горения подается снизу через решетку, либо в виде пыли. В последнем случае топливо перед подачей в топочное устройство измельчается до пылевого состояния, и в таком виде подается вместе с воздухом горения специальными пылеугольными горелками в топочное пространство.

На рис. 9.1 представлена одна из конструкций слоевой топки с качающимися колосниками. Подобные топки применяются в паровых котлах типа ДКВ. Топочный под образуется рядами колосников, расположенных вплотную друг к другу. Топливо механическим разбрасывателем подается равномерно на всю поверхность пода.

Воздух горения подается снизу в подподовое пространство. По мере выгорания топлива на колосниках образуется слой золы, препятствующий прохождению воздуха через слой топлива. Для удаления золы колосники вручную поворачиваются на некоторый угол, и зола проваливается в золовые бункеры, откуда отвозится вагонетками.

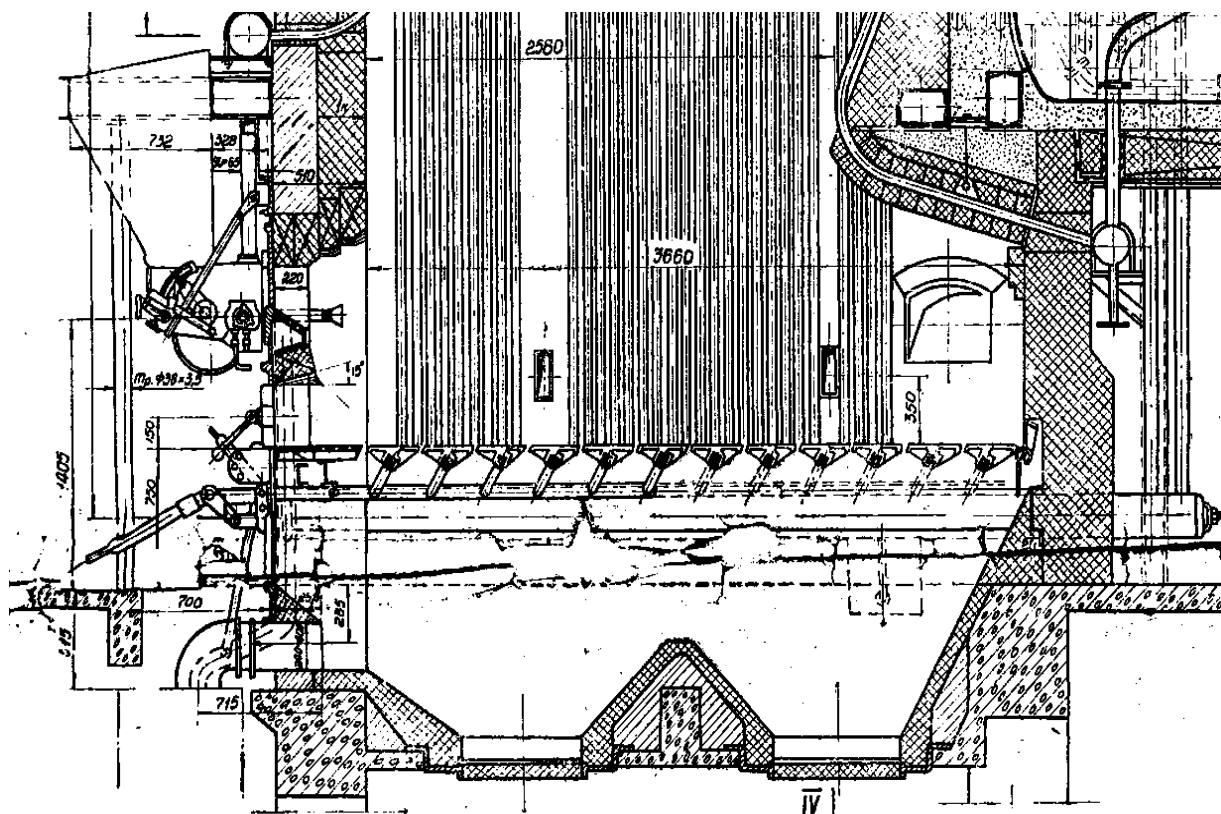


Рисунок 9.1 – Слойевая топка с качающимися колосниками

Недостатки подобных топок: неравномерность слоя топлива по поду; потери несгоревшего топлива при повороте колосников; возможность прогорания колосников, которые постоянно находятся в зоне высоких температур.

От некоторых недостатков подобного метода сжигания твердого топлива позволяет избавиться слоевая топка с подвижной (цепной) решеткой, конструкции которой приведены на рис. 9.2 и 9.3.

другого слоевого метода сжигания твердого топлива, характерен высокий механический недожог топлива. Этот метод сжигания твердого топлива не может применяться для топлив с малым содержанием летучих (антрациты и тощие угли).

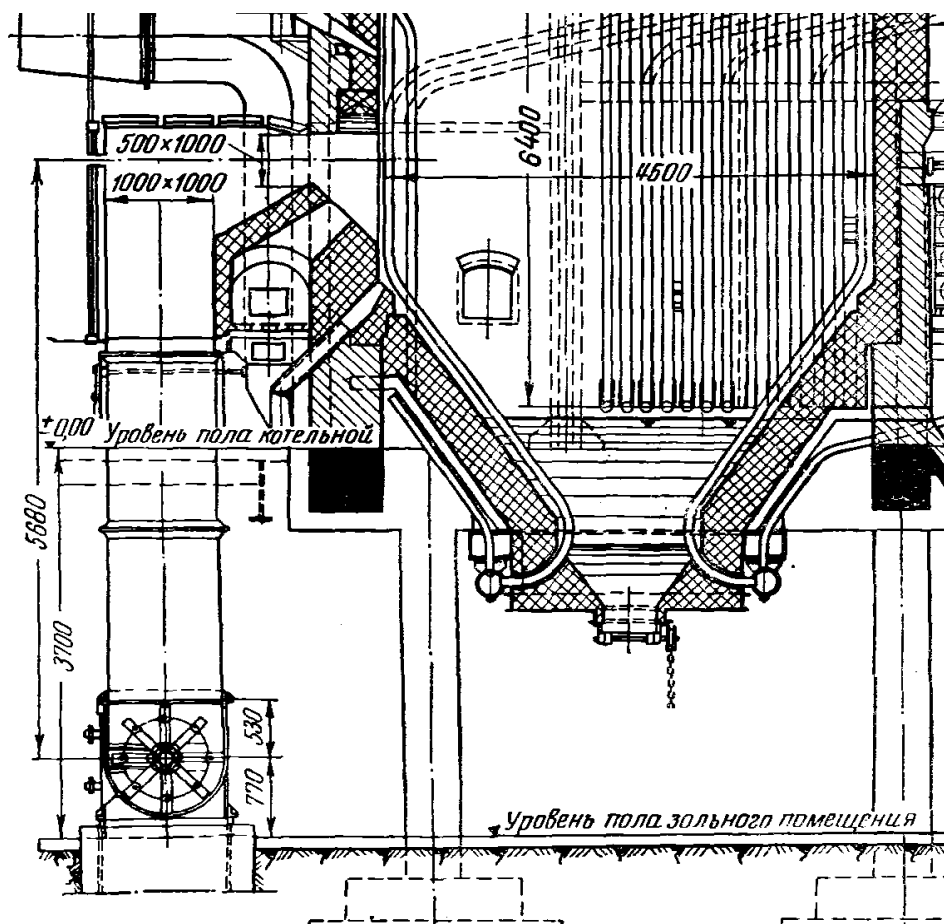


Рисунок 9.4 – Камерная топка с центробежной мельницей

Наиболее современным методом сжигания твердых топлив, применяемым в современных энергетических котлах, является пылеугольный метод, при котором угли предварительно измельчаются в мельницах различного типа (шаровые, центробежные и т.д.), а затем вместе с воздухом горения полученная пыль подается в топочное пространство. На рис. 9.4 приведена одна из возможных конструкций камерной топки с центробежной мельницей. Кусковой уголь подается в мельницу, где измельчается до пылевого состояния. Воздух горения, проходящий через мельницу, увлекает за собою топливную пыль и подается в топочное пространство через горелочную амбразуру. Вертикальный канал от мельницы до горелки играет роль сепаратора пыли, т.к. более крупные частицы угля не могут быть унесены потоком воздуха и снова попадают в мельницу. Относительно крупные частицы золы выпадают из топочного пространства в нижнюю горловину топки (золовый бункер), а мелкие частицы уносятся потоком на хвостовые поверхности котла. Последнее обстоятельство определяет один из основных недостатков пылевого способа сжигания твердого топлива – занос пароперегревателя и хвостовых поверхностей

котла золой топлива. Для снижения этого заноса в конструкции котлов на пылеугольном отоплении должны быть предусмотрены специальные меры по удалению частиц золы из потока продуктов сгорания (повороты потока с сепарацией частиц золы и т.п.).

Следует отметить, что расчет и выбор конструкции топочного устройства для сжигания твердого топлива будет подробно рассматриваться в курсе «Парогенераторы промышленных предприятий», поэтому данный курс ограничивается только анализом основных конструкций топочных устройств.

10. ЗАДАЧИ ПО СТАТИКЕ ГОРЕНИЯ

10.1. Определить состав продуктов сгорания и необходимую температуру подогрева воздуха горения при реформации газообразного топлива с сажеобразованием, если: состав топлива – $\text{CH}_4 = 90\%$; $\text{C}_2\text{H}_6 = 5\%$; $\text{CO}_2 = 3\%$; $\text{N}_2 = 2\%$; $\alpha = 0,5$; $T_p = 1600\text{K}$.

Решение. Объем воздуха горения

$$V_B = \alpha \cdot 4,76(2 \text{CH}_4 + 3,5 \text{C}_2\text{H}_6) = 0,5 \cdot 4,76(2 \cdot 0,9 + 3,5 \cdot 0,05) = 4,46 \text{ нм}^3/\text{нм}^3\text{Г.}$$

Объем азота

$$V_{\text{N}_2} = 0,79V_B + \text{N}_2 = 0,79 \cdot 4,46 + 0,02 = 3,543 \text{ нм}^3/\text{нм}^3\text{Г.}$$

Состав продуктов сгорания, при условии, что гомологи метана полностью разложились, будет

$$V_{\text{п.с.}} = V_{\text{N}_2} + V_{\text{CO}_2} + V_{\text{CO}} + V_{\text{H}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{CH}_4}.$$

Объем водяного пара при условии полного сгорания части топлива, пропорциональной коэффициенту избытка воздуха:

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = \alpha (2 \text{CH}_4 + 3 \text{C}_2\text{H}_6) = 0,5(2 \cdot 0,9 + 3 \cdot 0,05) = 1,05 \text{ нм}^3/\text{нм}^3\text{Г.}$$

Обозначим количество метана, разложившееся по реакции $\text{C}_T + 2 \text{H}_2 \Leftrightarrow \text{CH}_4$, как Y .

Тогда количество образовавшегося водорода будет

$$V_{\text{H}_2} = 2Y + (\alpha - 1) \cdot 3\text{C}_2\text{H}_6 = 2Y + 0,5 \cdot 3 \cdot 0,05 = 2Y + 0,075.$$

Количество метана, оставшееся в продуктах сгорания, будет:

$$V_{\text{CH}_4} = (\alpha - 1)\text{CH}_4 - Y = 0,5 \cdot 0,9 - Y = 0,45 - Y.$$

При равновесном состоянии количество метана и водорода в продуктах сгорания определяется константой равновесия реакции разложения метана. Тогда

$$K_C = \frac{V_{\text{CH}_4}}{V_{\text{H}_2}^2} = \frac{0,45 - Y}{(2Y + 0,075)^2} = 0,0016$$

Получаем квадратное уравнение $Y^2 + 156,325 Y - 70,311 = 0$. Откуда $Y = 0,4485$.

Тогда объем метана в продуктах сгорания

$$V_{\text{CH}_4} = 0,45 - Y = 0,45 - 0,4485 = 0,0015 \text{ нм}^3/\text{нм}^3\text{Г.}$$

Объем водорода в продуктах сгорания

$$V_{\text{H}_2} = 2Y + 0,075 = 2 \cdot 0,4485 + 0,075 = 0,972 \text{ нм}^3/\text{нм}^3\text{Г.}$$

Наличие свободного углерода в продуктах сгорания приводит к реакции восстановления углекислого газа до окиси углерода $\text{C} + \text{CO}_2 \leftrightarrow 2 \text{CO}$.

Обозначим количество восстановившегося углекислого газа как X . Тогда объем окиси углерода в продуктах сгорания

$$V_{\text{CO}} = 2X$$

Объем углекислого газа

$$V_{\text{CO}_2} = \alpha (\text{CH}_4 + 2\text{C}_2\text{H}_6) - X = 0,5 \cdot (0,9 + 2 \cdot 0,05) - X = 0,5 - X.$$

Соотношение между содержанием в продуктах сгорания водорода, водяного пара, окиси углерода и углекислого газа в равновесном состоянии определяется константой равновесия реакции $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$.

Получаем уравнение для определения X в виде

$$K_C = \frac{V_{\text{CO}_2} V_{\text{H}_2}}{V_{\text{CO}} V_{\text{H}_2\text{O}}} = \frac{(0,5 - X) \cdot 0,972}{2X \cdot 1,05} = 0,328.$$

Откуда $X = 0,293$.

Получаем $V_{\text{CO}_2} = 0,45 - X = 0,45 - 0,278 = 0,157 \text{ нм}^3/\text{нм}^3\text{Г}$, $V_{\text{CO}} = 2X = 0,586 \text{ нм}^3/\text{нм}^3\text{Г}$.

Объем продуктов сгорания в $\text{нм}^3/\text{нм}^3\text{Г}$

$$\begin{aligned} V_{\text{п.с.}} &= V_{\text{N}_2} + V_{\text{CO}_2} + V_{\text{CO}} + V_{\text{H}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{CH}_4} = \\ &= 3,543 + 0,157 + 0,586 + 0,972 + 1,05 + 0,0015 = 6,3095 \text{ нм}^3/\text{нм}^3\text{Г}. \end{aligned}$$

Количество образовавшегося сажистого углерода

$$\begin{aligned} C_T &= [Y - X/2 + 2(\alpha - 1)\text{C}_2\text{H}_6] \cdot 12/22,4 = \\ &= [0,4485 - 0,293/2 + 2 \cdot 0,5 \cdot 0,05] \cdot 12/22,4 = 0,189 \text{ кг}/\text{нм}^3\text{Г}. \end{aligned}$$

Для составления теплового баланса горения необходимо определить химически связанную теплоту, уносимую продуктами неполного горения в расчете на 1 м^3 исходного газа. Воспользуемся соотношениями (1.9) и (1.10).

Сажистый углерод уносит с собою

$$Q_1 = 33,9 \cdot 0,189 = 6,41 \text{ МДж}/\text{нм}^3\text{Г}.$$

Образовавшиеся H_2 и CO , а также не разложившийся метан уносят

$$Q_2 = 10,8\text{H}_2 + 12,6\text{CO} + 35,9\text{CH}_4 = 10,8 \cdot 0,972 + 12,6 \cdot 0,586 + 35,9 \cdot 0,0015 = 17,94 \text{ МДж}/\text{нм}^3\text{Г}.$$

Всего уносимая химическая теплота газов

$$Q_x = Q_1 + Q_2 = 6,41 + 17,94 = 24,35 \text{ МДж}/\text{нм}^3\text{Г}.$$

Восстановительная реакция эндотермическая, а ее тепловой эффект составляет $q_{\text{энд.}} = 7,85 \text{ [МДж}/\text{нм}^3\text{Г}]$. Тогда общие потери теплоты на эндотермическую реакцию составят

$$Q_{\text{энд.}} = q_{\text{энд.}} X = 7,85 \cdot 0,293 = 2,3 \text{ МДж}/\text{нм}^3\text{Г}.$$

Исходный газ имеет теплотворную способность

$$Q_{\text{H}}^c = 35,9\text{CH}_4 + 63,7\text{C}_2\text{H}_6 = 35,9 \cdot 0,9 + 63,7 \cdot 0,05 = 35,5 \text{ МДж}/\text{нм}^3\text{Г}.$$

Из теплового баланса процесса (считая его адиабатным) определим необходимую температуру подогрева воздуха

$$Q_H^c + I_B - Q_X - Q_{\text{энд.}} = t_T (V_{N_2} c'_{pN_2} + V_{CO_2} c'_{pCO_2} + \\ + V_{CO} c'_{pCO} + V_{H_2} c'_{pH_2} + V_{H_2O} c'_{pH_2O} + V_{CH_4} c'_{pCH_4}) \\ (35,5 - 24,35 - 2,3) \cdot 10^3 + I_B = 1327(3,543 \cdot 1,43 + 0,157 \cdot 2,29 + 0,586 \cdot 1,45 + \\ + 0,972 \cdot 1,35 + 1,05 \cdot 1,8 + 0,0015 \cdot 1,68)$$

Откуда $I_B = 2727$ кДж/м³Г. Учитывая, что $I_B = V_B c'_{pB} t_B$, получим $t_B = 456^\circ\text{C}$.

Расход вторичного воздуха для дожигания продуктов реформации

$$V_{\text{вт.в}}^0 = 8,89 C_T + 4,76[2V_{CH_4} + 0,5(V_{CO} + V_{H_2})] = \\ = 8,89 \cdot 0,189 + 4,76 \cdot (0,003 + 0,5 \cdot 1,558) = 5,4 \text{ нм}^3/\text{нм}^3\text{Г}$$

10.2. Определить состав продуктов сгорания и необходимую температуру подогрева воздуха горения при реформации газообразного топлива без сажеобразования, если: состав топлива – $CH_4 = 90\%$; $C_2H_6 = 5\%$; $CO_2 = 3\%$; $N_2 = 2\%$; $\alpha = 0,5$; $T_p = 1473$ К.

Решение. Объем воздуха горения

$$V_B = \alpha \cdot 4,76(2 CH_4 + 3,5 C_2H_6) = 0,5 \cdot 4,76 \cdot (2 \cdot 0,9 + 3,5 \cdot 0,05) = 4,46 \text{ м}^3/\text{м}^3\text{Г.}$$

Объем азота

$$V_{N_2} = 0,79 V_B + N_2 = 0,79 \cdot 4,46 + 0,02 = 3,543 \text{ м}^3/\text{м}^3\text{Г.}$$

Считая, что при хорошем перемешивании топлива и воздуха, углеводороды сгорают полностью с образованием как продуктов полного, так и не полного горения, состав продуктов сгорания будет

$$V_{\text{п.с.}} = V_{N_2} + V_{CO_2} + V_{CO} + V_{H_2} + V_{H_2O}.$$

Обозначив $V_{CO_2} = X$, $V_{CO} = Y$, $V_{H_2} = Z$, $V_{H_2O} = U$, составим балансы углерода, водорода и кислорода в исходных веществах и продуктах сгорания. Получим:

баланс углерода

$$CH_4 + 2 C_2H_6 + CO_2 = X + Y, \quad 1,03 = X + Y;$$

баланс водорода

$$2 CH_4 + 3 C_2H_6 + 0,0161 \cdot V_B = Z + U; \quad 2,022 = Z + U;$$

баланс кислорода

$$CO_2 + 0,21 V_B + 0,5 \cdot 0,0161 \cdot V_B = X + 0,5(Y + U), \quad 1,002 = X + 0,5(Y + U).$$

Соотношение между содержанием в продуктах сгорания H_2 , H_2O , CO , и CO_2 в равновесном состоянии, как и в предыдущем случае, определяется константой равновесия реакции $CO + H_2O \Leftrightarrow CO_2 + H_2$

$$K_C = \frac{V_{CO_2} V_{H_2}}{V_{CO} V_{H_2O}} = \frac{X \cdot Z}{Y \cdot U} = 0,3905$$

В итоге получаем систему четырех уравнений с четырьмя неизвестными. Для решения этой системы выразим все неизвестные величины через X . Получим:

$$Y = 1,03 - X; \quad U = 0,974 - X; \quad Z = 1,048 + X.$$

Подставим полученные соотношения в константу равновесия

$$K_C = \frac{X \cdot Z}{Y \cdot U} = \frac{X(1,048 + X)}{(1,03 - X)(0,974 - X)} = 0,3905$$

Получим квадратное уравнение относительно X

$$0,6095 X^2 + 1,7826 X - 0,3918 = 0,$$

решение которого $X = 0,2054$. Тогда $Y = 0,8246$; $U = 0,7686$; $Z = 1,2534$.

Состав продуктов сгорания получается в виде:

$$V_{п.с.} = V_{N_2} + V_{CO_2} + V_{CO} + V_{H_2} + V_{H_2O} = \\ = 3,543 + 0,2045 + 0,8246 + 1,2534 + 0,7686 = 6,594 \text{ м}^3/\text{м}^3\text{Г.}$$

Подобная реформация газообразного топлива предназначена для создания в рабочем пространстве нагревательной печи безокислительной атмосферы, для которой должны выполняться соотношения $CO/CO_2 > 3,5$; $H_2/H_2O > 1,5$. Проверим состав продуктов сгорания на это условие: $V_{CO}/V_{CO_2} = 4,01$; $V_{H_2}/V_{H_2O} = 1,63$. Таким образом, состав продуктов реформации отвечает предъявляемым требованиям.

Составим тепловой баланс адиабатного горения при данных условиях и найдем температуру подогрева воздуха. Для этого определим химически связанную теплоту, уносимую продуктами сгорания

$$Q_x = 10,8 H_2 + 12,6 CO = 10,8 \cdot 1,1953 + 12,6 \cdot 0,8827 = 24,03 \text{ МДж/м}^3\text{Г.}$$

Тепловой баланс будет иметь вид

$$Q_H^c + I_B - Q_x = t_T (V_{N_2} c'_{pN_2} + V_{CO_2} c'_{pCO_2} + V_{CO} c'_{pCO} + V_{H_2} c'_{pH_2} + V_{H_2O} c'_{pH_2O}). \\ (35,5 - 24,03) \cdot 10^3 + I_B = \\ = 1200(3,543 \cdot 1,45 + 0,2045 \cdot 2,34 + 0,8246 \cdot 1,47 + 1,2534 \cdot 1,37 + 0,7686 \cdot 1,85)$$

Откуда энтальпия воздуха $I_B = 490 \text{ кДж/м}^3$. Температуру подогрева воздуха определим последовательным приближением из $I_B = V_B c'_{pB} t_B$. Получим температуру воздуха $t_B = 84^\circ\text{C}$.

Расход вторичного воздуха для дожигания продуктов реформации

$$V_{вт.в}^0 = 4,76[0,5(V_{CO} + V_{H_2})] = 4,76 \cdot 0,5 \cdot 2,078 = 4,95 \text{ нм}^3/\text{нм}^3\text{Г}$$

11. ЗАДАЧИ ПО ДИНАМИКЕ ГОРЕНИЯ

11.1. Определить основные параметры воспламенения и горения гомогенной газовой смеси при адиабатных условиях, если кинетические параметры смеси: $E = 83,7 \text{ МДж/моль}$; $k_0 = 2 \cdot 10^6 \text{ 1/с}$; температура адиабатного горения $T_a = 1600 + T_0$. Начальная температура смеси $T_{01} = 300 \text{ К}$; $T_{02} = 1000 \text{ К}$.

Решение. При $T_{a1} = 1900 \text{ К}$ безразмерные параметры $\theta_{01} = 0,16$; критерий Аррениуса $Arr_1 = 83,7 \cdot 10^3 / (8,314 \cdot 1900) = 5,29$. Воспользовавшись (4.23) получим $\xi_{ад1} = 0,0125 \cdot \exp(5,29/0,16) = 3 \cdot 10^{12}$; $\tau_{ад1} = \xi_{ад1}/k_0 = 1,5 \cdot 10^6 \text{ с} = 416 \text{ час}$.

При $T_{a2} = 2600 \text{ К}$ безразмерные параметры $\theta_{02} = 0,385$; критерий Аррениуса $Arr_2 = 83,7 \cdot 10^3 / (8,314 \cdot 2600) = 3,87$. Воспользовавшись (4.23) получим

$$\xi_{ад2} = 0,0125 \cdot \exp(3,87/0,385) = 2,3 \cdot 10^4; \tau_{ад2} = \xi_{ад2}/k_0 = 0,012 \text{ с.}$$

Температура воспламенения по (4.24)

$$\theta_{в1} = 0,6 \exp(0,04 \cdot 5,29) = 0,74 \text{ и } T_{в1} = 1408 \text{ К.}$$

$$\theta_{B2} = 0,6 \exp(0,04 \cdot 3,87) = 0,7 \quad \text{и} \quad T_{B2} = 1821 \text{K}.$$

Температура максимума тепловыделения по (4.25)

$$\theta_1^* = 0,5 \cdot 5,29(\sqrt{1 + 4/5,29} - 1) = 0,86 \quad \text{и} \quad T_1^* = 1634 \text{K};$$

$$\theta_2^* = 0,5 \cdot 3,87(\sqrt{1 + 4/3,87} - 1) = 0,824 \quad \text{и} \quad T_2^* = 2143 \text{K}.$$

Время горения по (4.26):

$$\Delta \xi_{\tau 1} = \frac{1 - 0,16}{1 - 0,86} \exp(5,29/0,86) = 2815 \quad \text{и} \quad \tau_{\tau 1} = 1,4 \cdot 10^{-3} \text{ с};$$

$$\Delta \xi_{\tau 2} = \frac{1 - 0,385}{1 - 0,824} \exp(3,87/0,824) = 11,8 \quad \text{и} \quad \tau_{\tau 2} = 5,9 \cdot 10^{-6} \text{ с}.$$

11.2. Для условий предыдущей задачи определить основные параметры воспламенения смеси в цилиндрическом сосуде $d = 100$ мм, $h = 100$ мм, если коэффициент теплоотдачи к стенке сосуда $\alpha = 12$ Вт/(м²К), теплофизические характеристики смеси: $c_p = 1,63$ кДж/(кг·К); $\rho = 1,28$ кг/м³.

Решение. Определим критические значения критерия теплоотвода по (4.37)

$$\mu_{кр1} = 10 \cdot \exp(-0,9 \cdot 5,29/0,16) = 1,19 \cdot 10^{-12};$$

$$\mu_{кр2} = 10 \cdot \exp(-0,9 \cdot 3,87/0,385) = 1,18 \cdot 10^{-3}.$$

Найдем значение критерия теплоотвода по (4.29), учтя $F = \pi(0,1 \cdot 0,1 + 0,1^2/2) = 0,0471 \text{ м}^2$, $V = \pi \cdot 0,1^2 \cdot 0,1/4 = 7,85 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$:

$$\mu = 12 \cdot 0,0471 / (1630 \cdot 1,28 \cdot 7,85 \cdot 10^{-4} \cdot 2 \cdot 10^6) = 1,72 \cdot 10^{-7}.$$

Получаем, что в первом случае $\mu > \mu_{кр1}$ и воспламенения не произойдет. Во втором случае $\mu \ll \mu_{кр2}$ и параметры горения практически не отличаются от адиабатного горения.

11.3. Определить длину камеры сгорания газовой турбины и расход топлива, если состав топлива $\text{CH}_4 - 90\%$, $\text{C}_2\text{H}_6 - 10\%$, коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1,1$; $Q_n^c = 700$ МДж/моль; энергия активации $E = 95$ МДж/моль; $k_0 = 3,2 \cdot 10^{12}$. Диаметр камеры $d = 0,3$ м. Наружная поверхность камеры охлаждается и ее температура равна начальной температуре смеси $T_0 = 350 \text{ K}$. Коэффициент теплоотдачи от газовой смеси к поверхности камеры $\alpha_\Sigma = 200$ Вт/(м²К). Теплофизические характеристики смеси: $c_p' = 1,9$ кДж/(м³К); $a = 32 \cdot 10^{-5}$ м²/с. Фронт пламени считать плоским.

Решение. Объем воздуха горения:

$$V_B = 4,76 \cdot \alpha (2\text{CH}_4 + 3,5\text{C}_2\text{H}_6) = 4,76 \cdot 1,1 (1,8 + 0,35) = 11,25 \text{ м}^3 \text{ воз./м}^3 \text{ Г}.$$

$$\text{Объем смеси } V_{см} = V_r + V_B = 1 + 11,25 = 12,25 \text{ м}^3 \text{ см./м}^3 \text{ Г}.$$

$$\text{Концентрация топлива в смеси } C_0 = V_r / (V_{см} \mu \nu_H) = 1 / (12,25 \cdot 22,4) = 3,64 \cdot 10^{-3} \text{ моль/м}^3.$$

$$\text{Температура адиабатного горения} \quad T_a = T_0 + Q_n^c C_0 / c_p' = 350 + 7 \cdot 10^5 \cdot 3,64 \cdot 10^{-3} / 1,9 = 1691 \text{ K}.$$

$$\text{Безразмерные параметры процесса: } \theta_0 = T_0 / T_a = 350 / 1691 = 0,207,$$

$$\text{Arr} = E / (RT_a) = 95 \cdot 10^3 / (8,314 \cdot 1691) = 6,75;$$

$$\mu = \alpha U / (F c_p' k_0) = 200 \cdot 10^{-3} \cdot \pi \cdot 0,3 \cdot 4 / (\pi \cdot 0,3^2 \cdot 1,9 \cdot 3,2 \cdot 10^{12}) = 4,38 \cdot 10^{-13}.$$

Критическое значение параметра теплоотвода

$$\mu_{кр} = 10 \cdot \exp(-0,9 Arr / \theta_0) = 10 \cdot \exp(-0,9 \cdot 6,75 / 0,207) = 1,8 \cdot 10^{-12}.$$

Отношение $\mu / \mu_{кр} = 0,244$, и снижение скорости распространения фронта пламени

$$Re_T / Re_a = 0,365 + 0,635 \cdot \exp(-2,5 \mu / \mu_{кр}) = 0,365 + 0,635 \cdot \exp(-2,5 \cdot 0,244) = 0,71.$$

Нормальная скорость распространения фронта пламени при адиабатном горении

$$U_{на} = 0,23 \cdot \sqrt{ak_0 \theta_0^5 \exp(-1,5 Arr)} = \\ = 0,23 \cdot \sqrt{32 \cdot 10^{-5} 3,2 \cdot 10^{12} 0,207^5 \exp(-1,5 \cdot 6,75)} = 0,91 \text{ м/с.}$$

То же при наличии теплоотвода

$$U_{нт} = U_{на} \sqrt{0,71} = 0,91 \cdot 0,843 = 0,77 \text{ м/с.}$$

Период индукции при адиабатном воспламенении

$$\xi_a = 0,0125 \exp(Arr / \theta_0) = 0,0125 \cdot \exp(6,75 / 0,207) = 1,8 \cdot 10^{12};$$

$$\text{и } \tau_a = \xi_a / k_0 = 1,8 / 3,2 = 0,56 \text{ с.}$$

Увеличение периода индукции при теплообмене

$$\xi_a / \xi_T = 1,08 - 0,68 \mu / \mu_{кр} = 1,08 - 0,68 \cdot 0,244 = 0,914 \text{ и } \tau_T = \tau_a / 0,914 = 0,61 \text{ с.}$$

Учитывая, что время горения намного меньше времени индукции (см. выше), длина камеры сгорания

$$L_{кс} = U_{нт} \cdot \tau_T = 0,77 \cdot 0,61 = 0,47 \text{ м.}$$

Объемный расход продуктов сгорания на камеру

$$V_{пс} = U_{нт} \cdot F = 0,77 \cdot 0,0707 = 0,544 \text{ м}^3/\text{с.}$$

В силу $\mu / \mu_{кр} = 0,244$ можно считать, что температура горения близка к адиабатной, тогда расход продуктов сгорания при нормальных условиях

$$V_{пс.н.} = V_{пс} T_n / T_a = 0,544 \cdot 273 / 1691 = 0,0878 \text{ нм}^3/\text{с.}$$

Учитывая, что на 1 нм^3 газа выход продуктов сгорания составляет $12,25 \text{ нм}^3$, то расход газа на камеру сгорания

$$V_r = V_{пс.н.} / 12,25 = 7,16 \cdot 10^{-3} \text{ нм}^3/\text{с} = 25,8 \text{ нм}^3/\text{час.}$$

11.4. Определить область горения частиц антрацита в топочной камере при $T_T = 1400\text{К}$ для диаметров 1мм и $0,1\text{мм}$ при концентрации кислорода 10% .

Решение. Используя известную из таблицы энергию активации реакции (1) для антрацита $E_{(1)} = 140 \text{ МДж/моль}$, определим кинетические константы для реакций «сухой газификации», используя (6.14) и (6.15).

$$\lg(k_{01}) = 0,02E_{(1)} + 2 = 0,02 \cdot 140 + 2 = 4,8; \quad k_{01} = 6,3 \cdot 10^4 \text{ м/с.}$$

$$E_{(2)} = 1,1E_{(1)} = 1,1 \cdot 140 = 154 \text{ МДж/моль}; \quad \lg(k_{02}) = 0,02E_{(2)} + 2 = 0,02 \cdot 154 + 2 = 5,08; \\ k_{02} = 1,2 \cdot 10^5 \text{ м/с.}$$

$$E_{(3)} = 2,2E_{(1)} = 2,2 \cdot 140 = 308 \text{ МДж/моль}; \quad \lg(k_{03}) = 0,02E_{(3)} + 2 = 0,02 \cdot 308 + 2 = 8,16; \\ k_{03} = 1,44 \cdot 10^8 \text{ м/с.}$$

Для гетерогенных реакций определим температуру поверхности частицы по (6.44) для частицы $\delta_1 = 1\text{мм}$ и $\delta_2 = 0,1\text{мм}$ соответственно

$$\Delta T_1 = 0,206(1900 - T_r)^{0,74} \delta^{0,16} C_{O_2} = 0,206(1900 - 1400)^{0,74} 10 = 205^\circ\text{C},$$

$$\Delta T_2 = 0,206(1900 - T_r)^{0,74} \delta^{0,16} C_{O_2} = 205 \cdot 0,1^{0,16} = 142^\circ\text{C}.$$

Тогда $T_{n1} = 1605 \text{ K}$, $T_{n2} = 1542 \text{ K}$. И, используя закон Аррениуса, найдем константы скорости для гетерогенных реакций по

$$k_{j,i} = k_{0j,i} \cdot \exp(-E_{(j)}/RT_{ni})$$

Получим:

$$k_{1,1} = 1,7 \text{ м/с}, k_{1,2} = 1,14 \text{ м/с}, k_{2,1} = 1,17 \text{ м/с}; k_{2,2} = 0,73 \text{ м/с};$$

$$k_{3,1} = 0,014 \text{ м/с}; k_{3,2} = 0,047 \text{ м/с}.$$

Для реакции горения СО $E_4 = 96,3 \text{ МДж/моль}$, $k_{04} = 7,05 \cdot 10^6 \text{ 1/с}$. Тогда:

$$k_4 = k_{04} \cdot \exp(-E_{(4)}/RT_r) = 7,05 \cdot 10^6 \cdot \exp(-96,3 \cdot 10^3 / (8,314 \cdot 1400)) = 1,8 \cdot 10^3 \text{ 1/с}.$$

Для определения интенсивности диффузионного переноса массы необходимо найти скорость газового потока относительно стационарно движущейся в потоке частицы топлива. Для заданных размеров частиц найдем критерий Кирпичева по (6.51), приняв $\rho = 1300 \text{ кг/м}^3$ и найдя из уравнения состояния $\rho_0 = P/RT_r = 10^5 / (287 \cdot 1400) = 0,25 \text{ кг/м}^3$. Из таблиц $\nu = 2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$

$$Ki_1 = \delta_1 \sqrt[3]{\frac{4g(\rho - \rho_0)}{3\rho_0\nu^2}} = 10^{-3} \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 9,8 \cdot (1300 - 0,25)}{3 \cdot 0,25 \cdot (2 \cdot 10^{-4})^2}} = 11,9.$$

$$Ki_2 = \delta_2 \sqrt[3]{\frac{4g(\rho - \rho_0)}{3\rho_0\nu^2}} = 10^{-4} \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 9,8 \cdot (1300 - 0,25)}{3 \cdot 0,25 \cdot (2 \cdot 10^{-4})^2}} = 1,19.$$

Из (6.53) найдем критерий Шиллера для двух размеров частиц.

$$Sch_1 = \frac{Ki_1^2}{24(1 + Ki_1^{1,5}/36)} = \frac{11,9^2}{24(1 + 11,9^{1,5}/36)} = 2,76$$

$$Sch_2 = \frac{Ki_2^2}{24(1 + Ki_2^{1,5}/36)} = \frac{1,19^2}{24(1 + 1,19^{1,5}/36)} = 0,06.$$

Скорость витания для двух размеров частиц

$$w_{\text{вит1}} = 2,76 / \sqrt[3]{\frac{3 \cdot 0,25}{4 \cdot 9,8(1300 - 0,25) \cdot 2 \cdot 10^{-4}}} = 6,9 \text{ м/с};$$

$$w_{\text{вит2}} = 0,06 / \sqrt[3]{\frac{3 \cdot 0,25}{4 \cdot 9,8(1300 - 0,25) \cdot 2 \cdot 10^{-4}}} = 0,15 \text{ м/с};$$

Критерий Рейнольдса

$$Re_1 = w_{\text{вит1}} \delta_1 / \nu = 6,9 \cdot 10^{-3} / 2 \cdot 10^{-4} = 34,5$$

$$Re_2 = w_{\text{вит2}} \delta_2 / \nu = 0,15 \cdot 10^{-4} / 2 \cdot 10^{-4} = 0,075.$$

В силу малости критерия Рейнольдса для $\delta_2 = 0,1 \text{ мм}$ можно считать, что $Nu_2 = 2$.

$$\text{Для } \delta_1 = 1 \text{ мм } Nu_{D1} = 2 + 0,16 Re^{2/3} = 2 + 0,16 \cdot 34,5^{2/3} = 3,7$$

Коэффициент диффузии кислорода при нормальных условиях $D_0 = 0,18 \text{ см}^2/\text{с}$. При температуре топочной камеры $T_r = 1400 \text{ K}$

$$D = D_0 (T_r / T_0)^{1,5} = 0,18 \cdot (1400/273)^{1,5} = 2,09 \text{ см}^2/\text{с} = 2,09 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Коэффициент массоотдачи $\alpha_D = Nu_D D / \delta$. Тогда для принятых размеров

частиц получим

$$\alpha_{D1} = 3.7 \cdot 2,09 \cdot 10^{-4} / 10^{-3} = 0,78 \text{ м/с}; \alpha_{D2} = 2D/\delta_2 = 2 \cdot 2,09 \cdot 10^{-4} / 10^{-4} = 4,18 \text{ м/с.}$$

Следует отметить, что с уменьшением диаметра коксовой частицы при выгорании, коэффициент массоотдачи увеличивается.

Диффузионно-химические критерии для заданных размеров частиц:

$$N_1 = k_1/\alpha_D, N_{11} = k_{1,1}/\alpha_{D1} = 1,7/0,78 = 2,18; N_{12} = k_{1,2}/\alpha_{D2} = 1,14/4,18 = 0,27.$$

$$N_2 = k_2/\alpha_D, N_{21} = k_{2,1}/\alpha_{D1} = 1,17 / 0,78 = 1,5; N_{22} = k_{2,2}/\alpha_{D2} = 0,73/4,18 = 0,175.$$

Таким образом, при выгорании частицы размером 1 мм $N_{11} + N_{21} = 3,68$, т.е. выгорание происходит в смешанной области, где влияние оказывает как кинетика реакций, так и интенсивность диффузии. Для частицы диаметром 0,1мм $N_{12} + N_{22} = 0,445$, т.е. выгорание происходит также в смешанной области. Следует отметить, что при уменьшении диаметра частиц сумма $N_{12} + N_{22}$ будет уменьшаться и выгорание перейдет в кинетическую область. Для определения механизма выгорания частиц найдем критерий Семенова.

$$Se_1 = \sqrt{k_4 D} / \alpha_{D1} = \sqrt{1,8 \cdot 10^3 \cdot 2,9 \cdot 10^{-4}} / 0,78 = 0,92.$$

$$Se_2 = \sqrt{k_4 D} / \alpha_{D2} = \sqrt{1,8 \cdot 10^3 \cdot 2,9 \cdot 10^{-4}} / 4,18 = 0,17.$$

Таким образом, частица диаметром 1 мм выгорает по схеме одинарного горящего пограничного слоя, т.к. $0,4 < Se < 2$. Частица диаметром 0,1 мм выгорает по схеме не горящего пограничного слоя, т.к. $Se < 0,4$.

11.5. Используя данные предыдущей задачи, найти время выгорания частицы δ_2 , если парциальное давление кислорода в объеме $p_{1\Delta} = 1 \cdot 10^4$ Па, а $p_{2\Delta} = 0,1 \cdot 10^5$ Па.

Решение. Принимая, что поток углерода с поверхности частицы не зависит от размеров частицы, определим его как

$$G_C = 12 p_{1\Delta} (2k_2 + k_1) / (RT) = 12 \cdot 10^4 (2 \cdot 3,07 + 2,17) / (8314 \cdot 1400) = 0,86 \text{ кг/м}^2 \text{ с.}$$

Используя (6.63), получим

$$\tau_B = -\frac{\rho^0}{2 \delta_0} \int_0^{\delta_0} d\delta / G_C = -\frac{1300}{2 \cdot 0,86} \int_0^{\delta_0} d\delta = \frac{1300 \cdot 1 \cdot 10^{-4}}{1,72} = 0,076 \text{ с.}$$

ЛИТЕРАТУРА

1. Основы практической теории горения. Под ред. В.В. Померанцева. – Л.: «Энергия», 1973.
2. Metallurgical heat engineering, volume 1. Under the direction of M.A. Glinkova. – M.: «Metallurgy», 1974.
3. Knorre G.F. Theory of combustion processes – M.-L.: «Энергия», 1966.
4. Щукин А.А. Газовое и печное хозяйство заводов. М–Л.: Энергия, 1966.
5. Heat engineering calculations of metallurgical furnaces. Under the direction of A.S. Telegina. – M.: Metallurgy, 1978.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1. Классификация органического топлива	4
1.1. Технические характеристики топлива	5
2. Статика горения	8
2.1. Материальный баланс процесса горения	8
2.2. Определение коэффициента избытка воздуха по составу продуктов сгорания	12
2.3. Тепловой баланс процесса горения	14
3. Основы химического равновесия	16
3.1. Принцип Ле Шателье – Брауна	17
3.2. Закон действующих масс	17
3.3. Специфические процессы сжигания природного газа	18
4. Динамика горения	22
4.1. Основные положения динамики химических реакций	22
4.2. Динамика горения газовых смесей	24
5. Диффузия и массообмен	35
6. Горение углерода	37
6.1. Механизм выгорания углерода	37
6.2. Теория «приведенной пленки»	39
6.3. Не горящий пограничный слой	41
6.4. Двойной горящий пограничный слой	43
6.5. Условия выгорания коксовой частицы	45
7. Горение жидкого топлива	47
8. Горелочные устройства для сжигания газообразного топлива	50
8.1. Горелки с внешним смесеобразованием	50
8.2. Горелки с частичным внутренним смесеобразованием	51
8.3. Горелки с полным внутренним смесеобразованием	52
9. Топочные устройства для сжигания твердого топлива	53
10. Задачи по статике горения	57
11. Задачи по динамике горения	60
Литература	66

Навчальне видання

АКМЕН Роберт Генріхович

ПАЛИВО, ОСНОВИ ТЕОРІЇ ГОРІННЯ
ТА ПАЛИВНІ ПРИСТРОЇ

Текст лекцій
для студентів заочного навчання
фахів 7.095010 „Теплоенергетика”,
7.000008 „Енергетичний менеджмент”

Російською мовою

Відповідальний за випуск В.Г. Павловський
Роботу до видання рекомендував Є.Т. Зайченко

В авторській редакції

План 2005р., поз. 15

Підп. до друку _____ Формат 60x84 1/16. Папір офсетн. Друк – ризографія.
Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 5,2 Обл.-вид.арк _____ Тираж 150 прим.
Зам. _____ . Ціна договірна

Видавничий центр НТУ „ХПІ” 61002, Харків-2, вул. Фрунзе, 21
Свідоцтво про державну реєстрацію ДК №116 від 10.07.2000р.

Друкарня НТУ „ХПІ”, 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21