

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

ВЫСШАЯ ШКОЛА ТЕХНОЛОГИИ И ЭНЕРГЕТИКИ

Основы практической теории горения

Определение области и схемы горения твёрдого топлива

**Методические указания
по выполнению курсовой работы
для студентов очной и заочной форм обучения
по направлению 13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника**

**Санкт-Петербург
2020**

УДК 621.1.01

Основы практической теории горения. Определение области и схемы горения твёрдого топлива: метод. указания по выполнению курсовой работы / сост. В.Н. Белоусов, С.Н. Смородин, В.Д. Цимбал; ВШТЭ СПбГУПТД.- СПб., 2020. – 23 с.

Настоящие методические указания предназначены для продолжения изучения курса «Топливо и процессы горения в теплоэнергетических установках». В указаниях представлены основы теории приведённой пограничной плёнки, разработанной с целью совершенствования практических расчётов процесса горения твёрдого топлива, а также приведён порядок выполнения курсовой работы по курсу «Основы практической теории горения».

Методические указания составлены в соответствии с требованиями государственных образовательных стандартов, охватывают минимальный необходимый материал по дисциплине «Основы практической теории горения» для студентов очной и заочной форм обучения по направлению 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника».

Рецензенты: кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры
теплосиловых установок и термодинамики ВШТЭ
Н.Н. Гладышев

© Высшая школа технологии и энергетики
СПбГУПТД, 2020

© Белоусов В.Н., Смородин С.Н., Цимбал В.Д.,
2020

ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

При изучении курса "Основы практической теории горения" необходимо ознакомиться с содержанием тем, представленных в пособии, а затем изучить материал по рекомендованной литературе, при этом следует обращать внимание на физический смысл рассматриваемого явления и формулы, описывающие его.

При выполнении курсовой работы необходимо соблюдать следующие правила:

1. Переписать полностью текст каждого задания.
2. Указать словами, какая величина вычисляется, привести соответствующую формулу.
3. Для каждой найденной величины следует указать размерность.
4. В тексте решения каждого задания необходимо придерживаться терминов и обозначений, принятых в учебной литературе.
5. Выбор варианта задания производится по порядковому номеру студента в списке или по заданию преподавателя.

Расчетное определение области и схемы горения частиц твердого топлива

Задание

Определить **область** и **схему** горения частиц твердого топлива, в зависимости от размера частиц и температуры среды в топке.

Исходные данные

Выбрана камерная (факельная) технология сжигания топлива с твердым шлакоудалением; тип углеразмольных мельниц – молотковые мельницы (ММ). Вид и марка расчетного топлива.

Принимаем, что частицы шарообразные, плотность коксовых частиц – в табл. 1.

Таблица 1

Плотность частиц

Топливо	$\rho_{\text{ч}}$, кг/м ³
Антрацит и тощий уголь	1550-1680
Каменный уголь	1350-1550
Бурый уголь	1100-1350
Сланцы	1610-1770
Фрезерный торф	800-900
Древесина	700

Размеры частиц: δ_1 , δ_2 , δ_3 .

Температурные условия: t_1 , t_2 , t_3 °С (T_1 , T_2 , T_3 К).

Состав топочной среды – O_2 , CO_2 , N_2 %

(молярные доли составляющих газов: χ_{O_2} ; χ_{CO_2} ; χ_{N_2}).

Расчёт с целью определения **области** и **схемы горения** производится для частиц размером δ_1 , δ_2 , δ_3 при трёх заданных значениях температур T_1 , T_2 , T_3 , приведённых в табл. 2.

Один из вариантов расчёта должен быть приведён в подробном

развёрнутом виде в соответствии с приведённой ниже методикой (с подстановкой в формулы численных значений). Остальные расчётные значения сводятся в табл. 7.

Таблица 2

Исходные данные

№	Месторождение, марка топлива	Размер частиц, мм			Температура среды, °С			Состав среды, %		
		δ_1	δ_2	δ_3	t_1	t_2	t_3	O ₂	CO ₂	N ₂
1	Берёзовский 2Б	0,01	0,1	1	800	1200	1600	10	11	79
2	Челябинский 3Б	0,02	0,2	2	900	1300	1700	8	13	79
3	Интинский Д	0,03	0,3	3	1000	1400	1800	6	15	79
4	Донецкий А	0,005	0,05	0,5	750	1150	1550	5	16	79
5	Кузнецкий Т	0,006	0,06	0,6	850	1250	1650	7	14	79
6	Печорский Ж	0,007	0,07	0,7	950	1350	1750	9	12	79
7	Кузнецкий Д	0,008	0,08	0,8	1050	1450	1850	10	11	79
8	Кизеловский Г	0,009	0,09	0,9	800	1300	1800	5	16	79
9	Кузнецкий СС	0,01	0,1	1	900	1350	1700	10	11	79
10	Итатский 1Б	0,02	0,2	2	1000	1400	1800	5	16	79
11	Аркагалинский Д	0,009	0,09	0,9	850	1250	1650	8	13	79
12	Ольховатский А	0,007	0,07	0,7	750	1150	1550	5	16	79
13	Ирша-Бородинский 2Б	0,02	0,2	2	1000	1400	1800	10	11	79
14	Азейский 3Б	0,01	0,1	1	900	1300	1700	5	16	79
15	Донецкий Д	0,008	0,08	0,8	850	1250	1650	6	15	79
16	Воркутинский Ж	0,006	0,06	0,6	950	1350	1750	7	14	79
17	Мугунский 3Б	0,009	0,09	0,9	750	1150	1550	8	13	79
18	Аркагалинский Д	0,007	0,07	0,7	800	1200	1600	7	14	79
19	Галимовский А	0,005	0,05	0,5	1000	1400	1800	6	15	79
20	Тарбагатайский 3Б	0,01	0,1	1	900	1300	1700	5	16	79

Методика расчёта

Основные реакции горения углерода

Рассмотрим наиболее простой вариант – «сухую» газификацию коксовой частицы, когда водяные пары H_2O в топочном объёме отсутствуют.

При высокотемпературном горении углерода возможны две *первичные* реакции прямого *гетерогенного* окисления (на внешней поверхности частицы и на поверхности пор), которые могут протекать одновременно [1]:



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

- восстановление диоксида углерода на поверхности частицы (*гетерогенная эндотермическая реакция*)



- взаимодействие образовавшегося по реакции (2) оксида углерода CO с диффундирующим из объёма кислородом (*гомогенная реакция*)



1. Определение области горения твердого топлива

Согласно диффузионно-кинетической теории горения, различают следующие области горения: *кинетическая*, *диффузионная* и *промежуточная* (диффузионно-кинетическая) [4, 5].

Для определения области горения необходимо найти значения *диффузионно-кинетических критериев* $N_i = k_i / \alpha_D$ (для частиц размером δ_c при расчётной температуре T):

- при $N_1 + N_2 < 0,1$ – горение протекает в кинетической области;
- при $N_1 + N_2 > 10$ – горение идет в диффузионной области;
- при $0,1 < N_1 + N_2 < 10$ – промежуточная область горения.

Здесь
$$N_1 = \frac{k_1}{\alpha_D}, \quad N_2 = \frac{k_2}{\alpha_D}, \quad (5)$$

где k_1, k_2 – константы скорости реакций (1) и (2), соответственно,
 α_D – коэффициент диффузионного массообмена реакций (1) и (2).

1.1. Расчет значений кинетических констант горения кокса и коэффициентов диффузионного массообмена для условий горения частиц

1.1.1. Константа скорости реакции

Константы скорости реакций определяются по формуле

$$k_i = k_{0i} \cdot \exp\left(-\frac{E_i}{R \cdot T_q}\right), \quad (6)$$

где k_{0i} – предэкспоненциальный множитель (вероятностный фактор), м/с;

E_i – энергия активации, кДж/кмоль;

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

T_q – температура, К.

Расчет констант скорости *гетерогенных* реакций (1) и (2) производится при температуре частицы соответствующего размера $T = T_q$, для гомогенной реакции (4) догорания окиси углерода CO – при средней

расчётной температуре $T_p = \frac{T_q + T_z}{2}$.

Температура поверхности частиц $T_q = T_z + \Delta T$ определяется по эмпирической формуле Бабия В.И. [1, 2]:

$$\Delta T = T_4 - T_2 = 0,206(1900 - T_2)^{0,74} \cdot \delta^{-0,16} \cdot C_{O_2}, \quad (7)$$

ΔT – превышение температуры частицы над температурой среды;

T_4 и T_2 – соответственно, температура частиц и газов, К;

δ – размер частиц, мм; C_{O_2} – концентрация кислорода, %.

Для *мелких частиц* и при *высоких концентрациях кислорода* O_2 температура частицы может превышать температуру среды на 500÷700 °С.

С уменьшением концентрации O_2 температура частицы понижается, а при содержании O_2 в дымовых газах 5 % превышает температуру газов лишь на 100 °С.

Для концентраций кислорода $C_{O_2} < 5\%$ и сравнительно *крупных* частиц можно пренебрегать превышением температуры частицы над температурой газов ΔT , т.е. $T_4 = T_2$.

Расчет *константы скорости* k_1 производится с использованием *энергии активации* горения углерода кокса *различных углей* E_1 , значения которых приведены в табл. 3.

Таблица 3

Энергия активации E_1 для различных видов топлива

Вид топлива	Энергия активации, E_1 , МДж/кмоль
Древесный уголь	75...84
Торф	85
Бурый уголь	90...105
Каменный уголь	115...135
Тощий уголь и антрацит	140...155

Константа скорости k_2 определяется с помощью соотношения энергий активации различных реакций [1, 2].

На основании анализа многочисленных опытных данных получено:

$$\frac{E_2}{E_1} = 1,1. \quad (8)$$

Значения *предэкспоненциального множителя константы скорости*

реакций (1) и (2) определяются по зависимости между энергией активации E_i и k_{oi} , полученной Шестаковым С.М. [1, 2]:

$$\lg k_{oi} = 0,2 \cdot 10^{-4} \cdot E_i + 2, \quad (9)$$

где E_i – энергия активации соответствующей реакции, кДж/кмоль.

Для гомогенной реакции (4), которая протекает в пограничном слое около частицы, кинетические характеристики на основании многочисленных исследований принимают следующие значения [1, 2]:

$$k_{04} = 7,05 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}; \quad E_4 = 96,3 \text{ МДж / кмоль}. \quad (10)$$

Таким образом, алгоритм расчёта констант скорости реакций горения выглядит следующим образом:

- 1 – энергия активации E_1 – табл. 3;
- 2 – энергия активации E_2 – формула (8);
- 3 – предэкспоненциальные множители k_{o1} , k_{o2} – формула (9);
- 4 – превышение температуры частицы над температурой газового потока ΔT – формула (7);
- 5 – температура частицы T_c ;
- 6 – константы скорости реакций (1) и (2) – формула (6).

1.1.2. Коэффициент диффузионного массообмена

Коэффициент диффузионного массообмена α_D определяется из расчётного значения диффузионного критерия Нуссельта

$$Nu_D = \frac{\alpha_D \cdot \delta_c}{D_{1n}}, \quad (11)$$

где δ_c – размер частицы, м; D_{1n} – коэффициент диффузии в трёхкомпонентной смеси $[\text{O}_2 + \text{N}_2 + \text{CO}_2]$, м²/с.

Для расчета диффузионного критерия Нуссельта используются зависимости [1, 2]:

- формула Кацнельсона-Тимофеевой для сферической частицы в стационарных условиях, справедлива при $0 < Pr_D^{0,33} Re^{0,54} < 800$

$$Nu_D = 2 + 0,03 \cdot Pr_D^{0,33} Re^{0,54} + 0,35 \cdot Pr_D^{0,36} Re^{0,8}; \quad (12)$$

- для сферической частицы в газовой среде в области низких значений критерия Рейнольдса более удобна формула Сокольского-Тимофеевой

$$Nu_D = 2 + 0,16 \cdot Re^{2/3}; \quad (13)$$

- формула Вырубова для сферических частиц в газовой среде при $Re > 200$

$$Nu_D = 0,54 \cdot \sqrt{Re}. \quad (14)$$

Критерий Рейнольдса, входящий в формулы (12-14), зависит от скорости витания $W_{вит}$ (скорости частицы относительно газового потока).

Расчёт скорости витания $W_{вит}$ углеродной частицы диаметром $\delta_ч$ в газовой среде с известными параметрами осуществляется в следующей последовательности:

1 – определение критерия Кирпичёва $Ki = f(\delta_ч, \rho_ч, \rho_г, \nu_г)$

$$Ki = \delta_ч \cdot \sqrt[3]{\frac{4g}{3\nu_г^2} \cdot \frac{\rho_ч - \rho_г}{\rho_г}}, \quad (15)$$

где $\rho_г, \nu_г$ – плотность и кинематическая вязкость дымовых газов при расчётной температуре (табл. 4);

$\rho_ч$ – плотность коксовой частицы;

g – ускорение свободного падения.

2 – определение критерия Шиллера $Sch = f(Ki)$

$$Sch = \frac{Ki^2}{24 \left(1 + \frac{Ki^{1,5}}{36} \right)}, \quad (16)$$

Свойства дымовых газов среднего состава

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c_p, \text{кДж/(кг}\cdot\text{К)}$	$\lambda \cdot 10^2, \text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$	$\alpha \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$\mu \cdot 10^6, \text{Па}\cdot\text{с}$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	Pr
0	1,295	1,042	2,28	16,9	15,8	12,20	0,72
100	0,950	1,068	3,13	30,8	20,4	21,54	0,69
200	0,748	1,097	4,01	48,9	24,5	32,80	0,67
300	0,617	1,122	4,84	69,9	28,2	45,81	0,65
400	0,525	1,151	5,70	94,3	31,7	60,38	0,64
500	0,457	1,185	6,56	121,1	34,8	76,30	0,63
600	0,405	1,214	7,42	150,9	37,9	93,61	0,62
700	0,363	1,239	8,27	183,8	40,7	112,1	0,61
800	0,330	1,264	9,15	219,7	43,4	131,8	0,60
900	0,301	1,290	10,0	258,0	45,9	152,5	0,59
1000	0,275	1,306	10,90	303,4	48,4	174,3	0,58
1100	0,257	1,323	11,75	345,5	50,7	197,1	0,57
1200	0,240	1,340	12,62	392,4	53,0	221,0	0,56

Примечание: при более высоких температура свойства дымовых газов определяются методом линейной интерполяции.

3 – определение скорости витания (м/с) $w_{\text{вум}} = f(\text{Sch})$

$$w_{\text{вум}} = \frac{\text{Sch}}{\sqrt[3]{\frac{3}{4g\nu_2} \cdot \frac{\rho_2}{\rho_4 - \rho_2}}}. \quad (17)$$

Таким образом, критерий Рейнольдса

$$\text{Re} = \frac{w_{\text{вум}} \cdot \delta_4}{\nu_2}. \quad (18)$$

Диффузионный критерий Прандтля Pr_D , входящий в формулу (12):

$$\text{Pr}_D = \frac{\nu}{D_{1n}}.$$

Коэффициент диффузии кислорода O_2 в трёхкомпонентной смеси $[\text{O}_2 + \text{N}_2 + \text{CO}_2]$ D_{1n} определяется по формуле

$$D_{1n} = \frac{1 - x_1}{\frac{x_2}{D_{O_2-CO_2}} + \frac{x_3}{D_{O_2-N_2}}}, \quad (19)$$

где $x_1 = \frac{p_1}{p}$, $x_2 = \frac{p_2}{p}$, $x_3 = \frac{p_3}{p}$ – молярные доли компонентов в смеси,

соответственно – O_2 , CO_2 и N_2 ,

p_1, p_2, p_3 – парциальные давления компонентов,

$D_{12} = D_{O_2-CO_2}$, $D_{13} = D_{O_2-N_2}$ – коэффициенты взаимной диффузии, соответственно, компонента 1 (O_2) в смеси с компонентом 2 (CO_2) и в смеси с компонентом 3 (N_2).

Коэффициенты взаимной диффузии O_2 в трехкомпонентной газовой смеси рассчитываются по формуле Сазерленда в модификации Косова:

$$D_{li} = D_{0li} \cdot \left[\frac{(C_1 + T_0) \cdot (C_i + T_0)}{(C_1 + T_p) \cdot (C_i + T_p)} \right]^{1/2} \cdot \left(\frac{T_p}{T_0} \right)^{5/2}, \quad (20)$$

где D_{0li} – коэффициент диффузии при давлении P_0 и температуре $T_0 = 273$ К (при н.у.), cm^2/c ; C_1, C_i – коэффициенты Сазерленда для составляющих смеси, К; T_p – расчётная температура, К.

В табл. 5 приведены значения коэффициентов взаимной диффузии для некоторых пар газов при н.у. и значения коэффициентов Сазерленда для различных газов.

Таблица 5

Коэффициенты Сазерленда и взаимной диффузии некоторых пар газов

i	Газ	Коэффициент Сазерленда C_i, K	Соединение	Коэффициент взаимной диффузии $D_{0li}, cm^2/c$
1	O_2	138	-	-
2	CO_2	255	$O_2 - CO_2$	0,139
3	N_2	107	$O_2 - N_2$	0,184
4	CO	102	$O_2 - CO$	0,185

После расчёта диффузионного критерия Нуссельта Nu_D формулы (12-14) и коэффициента диффузии кислорода O_2 в трёхкомпонентной смеси D_{1n} формула (19) определяется коэффициент массообмена

$$\alpha_D = \frac{Nu_D \cdot D_{1n}}{\delta}. \quad (21)$$

Далее по формулам (5) рассчитываются диффузионно-кинетические критерии N_1 и N_2 , и по сумме $(N_1 + N_2)$ определяется **область горения** топлива.

Примечание:

при $0,1 < N_1 + N_2 << 1$ – промежуточная область горения смещается в сторону *кинетического* горения,

при $1 << N_1 + N_2 < 10$ – промежуточная область горения смещается в сторону *диффузионного* горения.

2. Определение схемы горения твердого топлива

Для расчетной оценки *схемы горения* необходимо оценить значения критерия Семёнова Se для заданных размеров частиц δ_c и при расчётных температурах T_p .

Критерий Семёнова, позволяющий, по сути, оценить роль гомогенной реакции (4), по своему физическому смыслу характеризует отношение потока вещества, поглощённого гомогенной реакцией догорания $CO + O_2 \rightarrow CO_2$, к его диффузионному потоку, т.е. практически отражает борьбу двух процессов:

$$Se = \frac{\sqrt{k_4 \cdot D_{14}}}{\alpha_D}, \quad (22)$$

где k_4 – константа скорости гомогенной реакции

$$k_4 = k_{04} \cdot \exp\left(-\frac{E_4}{R \cdot T_p}\right);$$

$D_{14} = D_{O_2-CO}$ – коэффициент диффузии между O_2 и CO

$$D_{14} = D_{01-4} \cdot \left[\frac{(C_1 + T_0) \cdot (C_4 + T_0)}{(C_1 + T_p) \cdot (C_4 + T_p)} \right]^{1/2} \cdot \left(\frac{T_p}{T_0} \right)^{5/2}.$$

На основе разработанной теории приведённой пограничной плёнки (ППП) можно выделить следующие схемы горения твёрдого топлива.

Горящий пограничный слой. Кислород, несмотря на взаимодействие с CO , достигает поверхности частицы, в результате чего может протекать его прямое взаимодействие с углеродом кокса. Схема горящего (одинарного) пограничного слоя имеет место при значениях критерия Семёнова **$0,4 < Se < 2$** , когда при анализе необходимо учитывать горение CO в пределах ППП.

Двойной горящий пограничный слой. Кислород *не достигает* углеродной поверхности, расходуясь полностью в пределах приведённой плёнки на догорание CO . В этом случае выгорание углерода происходит только по *восстановительной реакции* $C + CO_2 = 2CO$. При этом пограничный слой делится на *негорящую* и *горящую* зоны, причём область горения располагается внутри приведённой плёнки между двумя зонами, в которых горение отсутствует. Переход к схеме ДГПС начинается при значении критерия Семёнова **$Se > 2$** . Если же **$Se > 10$** , то зона взаимодействия CO с O_2 становится настолько тонкой, что в конце концов превращается в поверхность, т.е. реакции будут протекать не во всём объёме ППП, а на какой-то поверхности горения внутри приведённой

плёнки ($Se \rightarrow \infty$).

Негорящий пограничный слой. Скорость горения СО невелика, и, следовательно, его горение в пределах ППП практически *не влияет* на распределение концентраций компонентов, прежде всего кислорода, который достигает поверхности, в результате чего протекают гетерогенные реакции. Таким образом, в пределах ППП протекают только диффузионные процессы, оксид углерода СО выходит из ПС и сгорает в газовом потоке. Схему негорящего пограничного слоя можно применять для анализа процесса горения при $Se < 0,4$, когда горением СО в пределах приведённой плёнки можно пренебречь.

Итак, *схемы горения:*

$Se < 0,4$ – негорящий ПС;

$0,4 < Se < 2$ – горящий ПС;

$Se > 2$, или $\left(\frac{1}{Se} + \frac{1}{2N_3} \right) \leq 0,5$ – переход к ДГПС;

$Se > 10 \rightarrow \infty$ – двойной ГПС.

3. Пример расчета области и схемы горения

В качестве исследуемого топлива выбран каменный уголь марки Г. Сжигание топлива будет осуществляться факельным способом в топочном устройстве с твёрдым шлакоудалением. Подготовка топлива осуществляется в системе пылеприготовления со среднеходной валковой мельницей (СВМ).

Исходные данные для расчёта приведены в табл. 6.

Принимается, что частицы имеют шарообразную форму, плотность каменного угля 1350 кг/м^3 (табл. 1).

Таблица 6

Исходные данные для расчёта области и схемы горения

№	Месторождение, марка топлива	Размер частиц, мм			Температура среды, °С			Состав среды, %		
		δ_1	δ_2	δ_3	t_1	t_2	t_3	O ₂	CO ₂	N ₂
1	Кузнецкий Г	0,01	0,1	1	800	1200	1600	10	11	79

На поверхности горячей частицы и вблизи неё протекают следующие химические реакции:

1. $C + O_2 = CO_2 + 395 \text{ МДж/кмоль}$;
2. $2C + O_2 = 2CO + 219 \text{ МДж/кмоль}$;
3. $C + CO_2 = 2CO - 176 \text{ МДж/кмоль}$;
4. $2CO + O_2 = 2CO_2 + 591 \text{ МДж/кмоль}$.

Ниже будет проиллюстрирован расчёт для частицы размером $\delta_1 = 10^{-5} \text{ м}$ при температуре в топке $T_{\text{ср},1} = 1073 \text{ К}$.

Область горения твердого топлива определяется по значению суммы диффузионно-кинетических критериев $N_1 + N_2$. Для их определения необходимо рассчитать константы скорости реакций и коэффициент массоотдачи.

Для того чтобы найти константы скорости k_1 и k_2 по закону Аррениуса, необходимо определить энергии активации для первичных

реакций горения углерода, предэкспоненциальные множители и температуру частицы.

Для горения каменного угля по первой реакции энергия активации E_1 принимается равной 120 МДж/кмоль (см. табл. 3). Энергия активации для второй реакции определяется по соотношению:

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{E_{C+O_2 \rightarrow CO}}{E_{C+O_2 \rightarrow CO_2}} = 1,1;$$

$$E_2 = 1,1 \cdot 120 = 132 \text{ МДж/кмоль.}$$

Предэкспоненциальные множители определяются по зависимости С.М. Шестакова (9):

$$\lg(k_{0_i}) = 0,2 \cdot 10^{-4} \cdot E_i + 2;$$

$$k_{0_1} = 10^{(0,2 \cdot 10^{-4} \cdot 120 \cdot 10^3 + 2)} = 25,1 \cdot 10^3 \text{ м/с};$$

$$k_{0_2} = 10^{(0,2 \cdot 10^{-4} \cdot 132 \cdot 10^3 + 2)} = 43,7 \cdot 10^3 \text{ м/с.}$$

Превышение температуры частицы над температурой газов рассчитывается по зависимости В. И. Бабия (7):

$$\Delta T = T_{\text{ч}} - T_{\text{г}} = 0,206(1900 - T_{\text{г}})^{0,74} \cdot \delta^{-0,16} \cdot C_{O_2};$$

$$\Delta T = 0,206(1900 - 1073)^{0,74} \cdot (10^{-5})^{-0,16} \cdot 10 = 621 \text{ К.}$$

Тогда температура частицы будет равна:

$$T_{\text{ч}} = T_{\text{г}} + \Delta T = 1073 + 621 = 1694 \text{ К.}$$

Константы скорости первичных реакций горения углерода (1.1) и (1.2) определяются по закону Аррениуса (6):

$$k_1 = k_{0_1} \cdot e^{-\frac{E_1}{RT_{\text{ч}}}} = 25,1 \cdot 10^3 \cdot e^{-\frac{120 \cdot 10^3}{8,314 \cdot 1694}} = 5,0 \text{ м/с};$$

$$k_2 = 43,7 \cdot 10^3 \cdot e^{-\frac{132 \cdot 10^3}{8,314 \cdot 1694}} = 3,7 \text{ м/с.}$$

Для расчёта диффузионного массообмена необходимо определить скорость потока газов относительно горячей частицы (скорость витания) и коэффициент диффузии для трёхкомпонентной смеси O_2 , N_2 и CO_2 .

Скорость витания определяется с помощью критериальной зависимости Шиллера и Кирпичева $Sch = f(Ki)$.

Коэффициент кинематической вязкости и плотность газов определяются при температуре 800 °С:

$$v = 135 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}};$$

$$\rho_{\Gamma} = \rho_{\Gamma_0} \cdot \frac{273}{273+t_{\Gamma}} = 1,293 \cdot \frac{273}{1073} = 0,329 \text{ кг/м}^3.$$

Скорость витания:

$$Ki = \delta^3 \sqrt{\frac{4g(\rho_{\text{ч}} - \rho_{\Gamma})}{3\rho_{\Gamma}v^2}} = \delta^3 \sqrt{\frac{4 \cdot 9,81 \cdot (1350 - 0,329)}{3 \cdot 0,329 \cdot 0,000135^2}} = 0,14;$$

$$Sch = \frac{Ki^2}{24(1 + \frac{Ki^{1,5}}{36})} = \frac{0,143^2}{24(1 + \frac{0,143^{1,5}}{36})} = 0,00085;$$

$$\omega_{\text{в}} = \frac{Sch}{\sqrt[3]{\frac{3\rho_{\Gamma}}{4g(\rho_{\text{ч}} - \rho_{\Gamma})v}}} = \frac{0,00085}{\sqrt[3]{\frac{3 \cdot 0,329}{4 \cdot 9,81 \cdot (1350 - 0,329) \cdot 0,000135}}} = 0,0016 \text{ м/с}.$$

Коэффициенты взаимной диффузии компонентов при расчётной температуре T_p определяются по полуэмпирической формуле Сазерленда в модификации Н. Д. Косова (20):

$$D_{1i} = D_{01i} \cdot \left[\frac{(C_1 + T_0) \cdot (C_i + T_0)}{(C_1 + T_p) \cdot (C_i + T_p)} \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{T_p}{T_0} \right)^{\frac{5}{2}},$$

где расчётная температура:

$$T_p = \frac{T_{\Gamma} + T_{\text{ч}}}{2} = \frac{1073 + 1694}{2} = 1383 \text{ К}.$$

Используя табл. 5, можно определить коэффициенты диффузии при нормальных условиях и коэффициенты Сазерленда.

Коэффициент взаимной диффузии кислорода и углекислого газа:

$$D_{12} = 0,139 \cdot \left[\frac{(138+273) \cdot (255+273)}{(138+1383) \cdot (255+1383)} \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{1383}{273} \right)^{\frac{5}{2}} = 2,37 \text{ см}^2/\text{с}.$$

Коэффициент взаимной диффузии кислорода и азота:

$$D_{13} = 0,187 \cdot \left[\frac{(138+273) \cdot (107+273)}{(138+1383) \cdot (107+1383)} \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{1383}{273} \right)^{\frac{5}{2}} = 2,84 \text{ см}^2/\text{с}.$$

Коэффициент диффузии для трёхкомпонентной смеси определяется следующим образом:

$$D_{1n} = \frac{1-x_1}{\frac{x_2}{D_{12}} + \frac{x_3}{D_{13}}} = \frac{1-0,1}{\frac{0,11}{2,37} + \frac{0,79}{2,84}} = 2,77 \text{ см}^2/\text{с}.$$

Массоотдача рассчитывается с помощью критериальных уравнений $Nu_D = f(Re, Pr_D)$.

Критерий Рейнольдса и диффузионный критерий Прандтля:

$$Re = \frac{\omega \cdot \delta}{\nu} = \frac{0,0016 \cdot 10^{-5}}{135 \cdot 10^{-6}} = 0,000119,$$

$$Pr_D = \frac{\nu}{D_{1n}} = \frac{0,000135}{2,77 \cdot 10^{-4}} = 0,487.$$

При $0 < Pr_D^{0,33} Re^{0,54} < 800$ в общем случае для сферической частицы в стационарных условиях Nu_D определяется по формуле Кацнельсона-Тимофеевой (12):

$$Nu_D = 2 + 0,03 \cdot Pr_D^{0,33} Re^{0,54} + 0,35 \cdot Pr_D^{0,36} Re^{0,8};$$

$$Nu_D = 2 + 0,03 \cdot 0,487^{0,33} \cdot 0,000119^{0,54} + 0,35 \cdot 0,487^{0,36} \cdot 0,000119^{0,8} = 2,00;$$

$$\alpha_{D_i} = \frac{Nu_D \cdot D_{1n}}{\delta} = \frac{2 \cdot 2,77 \cdot 10^{-4}}{10^{-5}} = 55,4 \text{ м/с}.$$

Диффузионно-кинетические критерии для первичных реакций горения углерода:

$$N_1 = \frac{k_1}{\alpha_D} = \frac{5,0}{55,4} = 0,090;$$

$$N_2 = \frac{k_2}{\alpha_D} = \frac{3,7}{55,4} = 0,067;$$

$$N_1 + N_2 = 0,090 + 0,067 = 0,157.$$

Диапазон $0,1 < N_1 + N_2 < 10$ соответствует *переходной* области горения.

Схема горения определяется по значению критерия Семёнова, для расчёта которого необходимо знать константу скорости гомогенной реакции (4) и коэффициент взаимной диффузии кислорода и оксида углерода.

Энергия активации и предэкспоненциальный множитель для гомогенной реакции (4):

$$E_4 = 96,8 \text{ МДж/кмоль};$$

$$k_{04} = 7050000 \text{ с}^{-1}.$$

Константа скорости реакции рассчитывается по закону Аррениуса (6):

$$k_4 = 7050000 \cdot e^{-\frac{96,8 \cdot 10^3}{8,314 \cdot 1383}} = 1559 \text{ с}^{-1}.$$

Коэффициент взаимной диффузии кислорода и оксида углерода находится по формуле Сазерленда в модификации Н. Д. Косова:

$$D_{14} = 0,185 \cdot \left[\frac{(138+273) \cdot (102+273)}{(198+1383) \cdot (102+1383)} \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{1383}{273} \right)^{\frac{5}{2}} = 2,79 \text{ см}^2/\text{с}.$$

Критерий Семёнова (22):

$$Se = \frac{\sqrt{k_4 \cdot D}}{\alpha_D} = \frac{\sqrt{1559 \cdot 2,79 \cdot 10^{-4}}}{55,4} = 0,012.$$

Таким образом, в данном случае имеет место схема горения с *негорящим пограничным слоем*, так как $Se < 0,4$.

Из проведенного расчёта области и схемы горения частицы твердого топлива следует, что условиям, в которых находится горящая частица каменного угля марки Г размером $\delta_1 = 10^{-5}$ м (10 мкм) при температуре в топочной камере $T_{cp,1} = 1073 \text{ K}$ (800 °C), будет соответствовать *переходная область горения и схема с негорящим пограничным слоем*.

Расчёты областей и схем горения для частиц других размеров при различных температурах в топке проводятся аналогично.

Результаты всех расчётов приведены в табл. 7.

Таблица 7

Сводная таблица результатов расчета

Величина	Обозначение	Разм-ть	Значение								
			1073			1473			1873		
Температура газа	T_r	К									
Размер частицы	δ	м	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}
Температура частицы	$T_{\text{ч}}$	К	1694	1502	1370	1854	1736	1655	1922	1907	1897
Константа скорости первой реакции	k_1	м/с	5,00	1,69	0,67	10,43	6,16	4,10	13,78	12,98	12,44
Константа скорости второй реакции	k_2		3,70	1,12	0,40	8,32	4,66	2,98	11,30	10,58	10,10
Константа скорости для четвертой реакции	k_4	с ⁻¹	1559	834	511	6428	4977	4124	15261	14890	14636
Скорость витания	$\omega_{\text{в}}$	м/с	0,0017	0,158	6,60	0,0014	0,133	6,65	0,0012	0,116	6,55
Коэффициент массообмена	$\alpha_{\text{д}}$	м/с	55,4	5,09	1,98	74,1	7,13	2,26	91,2	9,18	2,51
Диффузионно-кинетический критерий по первой реакции	N_1	—	0,090	0,332	0,337	0,141	0,864	1,811	0,151	1,414	4,957
Диффузионно-кинетический критерий по второй реакции	N_2		0,067	0,468	0,547	0,112	0,654	1,316	0,124	1,153	4,025
—	$N_1 + N_2$		0,157	1,125	1,378	0,253	1,517	3,126	0,275	2,567	8,982
Критерий Семенова	Se	—	0,012	0,090	0,173	0,021	0,186	0,522	0,029	0,284	1,027
Область горения			Пер.	Пер.	Пер.	Пер.	Пер.	Пер.	Пер.	Пер.	Пер.
Схема горения			НПС	НПС	НПС	НПС	НПС	ГПС	НПС	НПС	ГПС

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Померанцев В.В., Арефьев К.М., Ахмедов Д.Б. и др. Основы практической теории горения: учебное пособие для вузов / под ред. Померанцева В.В. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1986. – 312 с.
2. Померанцев В.В., Арефьев К.М., Ахмедов Д.Б. и др. Сборник задач по теории горения: учебное пособие для вузов / под ред. Померанцева В.В. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1983. – 152 с.
3. Белоусов В.Н., Смородин С.Н., Смирнова О.С. Топливо и теория горения. Ч.І. Топливо: учебное пособие / СПбГТУРП. – СПб., 2011.
4. Белоусов В.Н., Смородин С.Н., Смирнова О.С. Топливо и теория горения. Ч.ІІ. Основы процессов горения: учебное пособие / СПбГТУРП. – СПб., 2011.
5. Белоусов В.Н., Сергеев В.В. Топливо и теория горения: учебное пособие. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014, – 231 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Раздел	
Общие методические указания	3
Расчётное определение области и схемы горения частиц твёрдого топлива	4
Методика расчёта	6
1. Определение области горения твёрдого топлива	6
1.1. Расчет значений кинетических констант горения кокса и коэффициентов диффузионного массообмена для условий горения частиц	7
1.1.1. Константа скорости реакции	7
1.1.2. Коэффициент диффузионного массообмена	9
2. Определение схемы горения твёрдого топлива	13
3. Пример расчёта области и схемы горения	16
Библиографический список	22

Редактор Н.П.Новикова

Темплан 2020 г., поз. 57

Подп. к печати 18.05.2020. Формат 60×84/16. Бумага тип. № 1.
Печать офсетная. 1,5 печ.л.; 1,5 уч.-изд.л. Тираж 20 экз.
Изд.№ 57. Цена «С». Заказ

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