

ПРИМЕРЫ

Пример 7-1. Рассчитать изменение температуры сухой частицы бурого угля, попавшей в поток дымовых газов с температурой $T_r=1600$ К. Размер частицы $\delta=2 \cdot 10^{-4}$ м; начальная температура $T_0=400$ К; плотность частицы $\rho_{\text{ч}}=1200$ кг/м³.

Решение. Так как частица относительно невелика, примем $Nu=2$ [теплоемкость частицы $c_{\text{ч}}$ определим по формуле (7-5) для разных температур частицы в диапазоне 400—1600 К]. Тогда спустя $\tau=0,01$ с ($0,278 \cdot 10^{-5}$ ч) частица будет иметь температуру [см. формулу (7-3)]

$$T_{\text{ч}} = 1600 - (1600 - 400) \exp\left(-\frac{6 \cdot 2 \cdot 0,486}{1200 \cdot (2 \cdot 10^{-4})^2} \cdot 0,278 \cdot 10^{-5}\right) = 687 \text{ К};$$

спустя $\tau=0,04$ с $=1,112 \cdot 10^{-5}$ ч будет $T_{\text{ч}}=1191$ К;

» $\tau=0,08$ с $=2,224 \cdot 10^{-5}$ ч » $T_{\text{ч}}=1450$ К;

» $\tau=0,12$ с $=3,336 \cdot 10^{-5}$ ч » $T_{\text{ч}}=1541$ К

Пример 7-2. Рассчитать изменение температуры древесной частицы во времени с интервалом 0,4 с при следующих условиях: сухая частица с $\delta=0,85 \cdot 10^{-3}$ м и $T_0=373$ К попадает в среду с температурой 1353 К; время прогрева 2,4 с; $\rho_{\text{ч}}=280$ кг/м³.

Решение. Температуру частицы в любой момент времени можно рассчитать по зависимости (7-3). Для этого нужно знать Nu ; $c_{\text{ч}}$; λ_r . По таблице определяем λ_r . Теплоемкость частицы рассчитаем по зависимости (7-5) для каждого интервала температур. Для расчета критериев Ki и Sch воспользуемся соответствующими зависимостями главы 2:

$$Ki = 0,85 \cdot 10^{-3} \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 9,81 \cdot \left(280 - 1,293 \cdot \frac{273}{1353}\right)}{3 \cdot (206 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 1,293 \cdot \frac{273}{1353}}} = 5,68.$$

По формуле (2-12) (так как $Ki < 8,5$) находим $Sch=0,25$.

Отсюда скорость витания из выражения для критерия Шиллера

$$w_b = 0,25 \sqrt[3]{\frac{3,0 \cdot 1,293 \cdot \frac{273}{1373}}{4,9,81 \cdot 206 \cdot 10^{-6} \cdot \left(280 - 1,293 \cdot \frac{273}{1373}\right)}} = 0,372 \text{ м/с.}$$

$$\text{Критерий } Re = \frac{w_b \delta}{\nu} = \frac{0,372 \cdot 0,85 \cdot 10^{-3}}{206 \cdot 10^{-6}} = 1,534.$$

Критерий Nu определим по зависимости (3-25):

$$Nu = 2 + 0,16 \cdot 1,534^{2/3} = 2,21.$$

Подставляя полученные величины в формулу (7-3) и беря соответствующие временные интервалы, получим следующие температуры:

$t, \text{ с}$	0,4	0,8	1,2	1,6	2,0	2,4
$T_{\text{ч}}, \text{ К}$	940	1110	1120	1250	1290	1310

Пример 7-3. Определить область горения частицы антрацита в топке при температуре 1400 К, если известно, что размеры частицы $\delta = 5 \cdot 10^{-5}$; 10^{-4} и 10^{-3} м.

Решение. Согласно табл. 7-4 энергия активации антрацита $E_1 = 140 \cdot 10^3$ кДж/кмоль. По формуле (7-16) получим $k_{01} = 6,5 \cdot 10^4$ м/с. Тогда, используя зависимость Аррениуса, найдем, что при $T_{\text{ч}} = 1400$ К константа скорости будет: $k_1 = 0,424$ м/с; при $E_2 = 1,1 E_1 = 154 \cdot 10^8$ кДж/кмоль и $k_{02} = 1,3 \cdot 10^5$ м/с константа скорости $k_2 = 0,23$ м/с.

Для реакции догорания СО можно использовать следующие кинетические характеристики: $E_3 = 96,3 \cdot 10^3$ кДж/кмоль; $k_{03} = 7,05 \cdot 10^6$ с $^{-1}$. Тогда $k_3 = 19 \cdot 10^3$ с $^{-1}$.

Для малых частиц $5 \cdot 10^{-5}$ и 10^{-4} м, скорость витания которых невелика, можно считать $Nu = 2$ (в условиях прямоточного факела). Отсюда $\alpha_D = 2D/\delta$. Для $T = 1400$ К $D_{O_2-N_2-CO_2} \approx 2,8 \cdot 10^{-4}$ м 2 /с (для диффузии кислорода в многокомпонентной смеси отличие от этого значения в наших условиях будет небольшим). Тогда для частицы $\delta = 5 \cdot 10^{-5}$ м получим $\alpha_D = 2 \cdot 2,8 \cdot 10^{-4} / (5 \cdot 10^{-5}) = 11,2$ м/с, а для $\delta = 10^{-4}$ м $\alpha_D = 2 \cdot 2,8 \cdot 10^{-4} / 10^{-4} = 5,6$ м/с. Кинетической области соответствует $N_1 + N_2 \leq 0,1$. В наших условиях для $\delta = 5 \cdot 10^{-5}$ м имеем $k_1/\alpha_D + k_2/\alpha_D = 0,424/11,2 + 0,23/11,2 \approx 0,058$ и для $\delta = 10^{-4}$ м $N_1 + N_2 = 0,117$, т. е. процесс горения первой частицы протекает в кинетической области, а второй частицы вблизи границы кинетической и промежуточной областей.

Оценим влияние 4-й реакции (реакции догорания СО у поверхности частицы). Так как $D_{CO-O_2} \approx 3 \cdot 10^{-4}$ м 2 /с, то для $\delta = 5 \cdot 10^{-5}$ м $Se = \sqrt{1900 \cdot 3 \cdot 10^{-4} / 11,2} \approx 0,07 \ll 0,4$, а для $\delta = 10^{-4}$ м $Se = 0,14 < 0,4$, т. е. имеем негорящий пограничный слой.

Для более крупной частицы $\delta = 10^{-3}$ м скорость витания в наших условиях можно найти, используя зависимости главы 2: получим $W_b \approx 2,7$ м/с. Тогда $Re = 2,7 \cdot 10^{-3} / (2 \cdot 10^{-4}) \approx 13$; $Nu = 2 + 0,16 Re^{2/3} = 2,86$. В этих условиях $\alpha_D = 2,86 \cdot 2,8 \cdot 10^{-4} / 10^{-3} \approx 0,8$ м/с; $(k_1 + k_2)/\alpha_D = (0,424 + 0,23)/0,8 \approx 0,8$, т. е. имеем промежуточную область, в которой диффузия и кинетика практически равноценно определяют выгорание. Определим схему выгорания. Для этого рассчитаем критерий $Se = \sqrt{1900 \cdot 3 \cdot 10^{-4} / 0,8} \approx 1$; таким образом, имеем схему с «горящим» пограничным слоем.

Пример 7-4. Определить парциальное давление кислорода у поверхности горячей частицы (антрацит) с $\delta = 10^{-4}$ м, находящейся в топке при температуре 1400 К. Оценить расход кислорода или углерода в первый период, когда еще не произошло существенного изменения размеров частицы. Парциальное давление кислорода в объеме составляет 10 кПа, так же как и углекислоты.

Решение. Будем использовать те же кинетические характеристики, что и в примере 7-3. Тогда при заданных условиях $k_1=0,424$ м/с; $k_2=0,23$ м/с; $k_3=5 \cdot 10^{-4}$ м/с. Коэффициенты диффузии $D_{O_2-N_2}=2,8 \cdot 10^{-4}$ м²/с; $D_{CO_2-N_2}=2,2 \cdot 10^{-4}$ м²/с;

Как было показано в примере 7-3, мы имеем $\alpha_D \approx 5,6$ м/с и соответственно $N_1=0,076$; $N_2=0,041$ и $N_3=0,9 \cdot 10^{-4}$, т. е. негорящий пограничный слой; тогда, воспользовавшись выражением (7-48) при $p_{5\Delta}=0$, определим $p_{10}=10/(1+0,076+0,041) \approx 8,6$ кПа, т. е. поверхностная концентрация отличается от объемной при заданных условиях процесса только на 14 %.

Для потока кислорода или скорости выгорания углерода в этих условиях (кинетическая область и негорящий пограничный слой) можно воспользоваться зависимостью (7-50):

$$G_C = \frac{5,6}{8,314 \cdot 1400} \frac{1}{(1+0,9 \cdot 10^{-4})(1+0,076+0,041)} \{10 [0,076(1+2 \times 0,9 \cdot 10^{-4}) + 2 \cdot 0,041(1+0,9 \cdot 10^{-4})] + 10 \cdot 0,9 \cdot 10^{-4}(1+0,076+0,041)\} =$$

$$= 6,81 \cdot 10^{-4} \frac{\text{кмоль}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}} = 6,81 \cdot 10^{-4} \cdot 12 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}} = 8,17 \cdot 10^{-3} \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}).$$

Пример 7-5. Оценить (приблизительно) время выгорания частицы антрацитового кокса при температуре 1400 К. Известно, что горение происходит в точечной среде и средние парциальные давления газовых компонентов $p_{1\Delta} = p_{2\Delta} = 10$ кПа. Начальный размер частицы $\delta_0 = 10^{-4}$ м.

Решение. Для определения времени выгорания частицы воспользуемся выражением (7-11). В предыдущей задаче было показано, что при наших условиях мы имеем кинетическую область и негорящий пограничный слой, т. е. для определения G_C можно использовать формулу (7-50). Для мелкой частицы, как показано в примере 7-3, если $Re < 1$, то $Nu = 2$. Отсюда $\alpha_D = 2D/\delta$, т. е. α_D будет возрастать с уменьшением размеров частицы.

Для заданных условий $N_1=0,076$; $N_2=0,041$ и $N_3=0,9 \cdot 10^{-4}$, причем эти критерии будут уменьшаться по мере выгорания. Тогда, учитывая, что N_1 , N_2 и N_3 будут много меньше 1, можно упростить выражение (7-50):

$$G_C = \frac{\alpha_D}{RT} [p_{1\Delta}(2N_2+N_1) + N_3 p_{2\Delta}];$$

кроме того, если учесть, что $N_3 \ll N_1$ и $N_3 \ll N_2$ и что по мере выгорания процесс все глубже будет переходить в кинетическую область, то $G_C = \frac{k_1 + 2k_2}{RT} p_{1\Delta}$, т. е. поток углерода не зависит

от размеров частицы, а является только функцией температуры и парциального давления кислорода в объеме. При этом время выгорания после интегрирования будет $\tau = \rho_c A \delta_0$, где

$$A = \frac{RT}{2M_C p_{1\Delta}(k_1 + 2k_2)} = \frac{8,314 \cdot 1400}{2 \cdot 12 \cdot 10 \cdot (0,424 + 2 \cdot 0,23)} = 54,9;$$

$$\tau = 1300 \cdot 54,9 \cdot 10^{-4} = 7,1 \text{ с.}$$

Пример 7-6. Рассмотреть условия выгорания коксовых частиц фрезерного торфа диаметром $5 \cdot 10^{-5}$ и 10^{-3} м в конечной части прямоточного факела. Парциальные давления компонентов в потоке равны: кислорода $p_{1\Delta}=6$ кПа; углекислоты $p_{2\Delta}=10$ кПа; водяных паров $p_{5\Delta}=20$ кПа.

Определить парциальные давления компонентов на поверхности частицы и поверхностную скорость горения при температуре в топке 1400 К.

Решение. Энергию активации реакции $C+O_2 \rightarrow CO_2$ примем по табл. 7-4: $E_1=83\,600$ кДж/кмоль. По формуле (7-16) находим k_{01} :

$$\lg k_{01} = 0,2 \cdot 10^{-4} \cdot 83\,600 + 2 = 3,675; \quad k_{01} = 4,73 \cdot 10^3 \text{ м/с.}$$

По зависимости Аррениуса определяем константу скорости указанной реакции при $T=1400$ К:

$$k_1 = 4,73 \cdot 10^3 e^{-83\,600/(8,314 \cdot 1400)} = 4,13 \text{ м/с.}$$

Считая, что $E_2=1,1 E_1$; $E_3=2,2 E_1$, а $E_3'=1,6 E_1$ (см. стр. 178), аналогично находим константы скоростей остальных реакций: $k_2=3,8$ м/с; $k_3=0,155$ м/с; $k_3'=0,89$ м/с. Для реакции горения H_2+O_2 можно использовать следующие кинетические характеристики (см. табл. 6-1): $E_4'=130\ 000$ кДж/кмоль; $k_{04}'=2,137 \cdot 10^{14}$ с $^{-1}$; тогда $k_4'=5,63 \cdot 10^9$ с $^{-1}$. Для частицы с $\delta_0=5 \cdot 10^{-5}$ м можно принять $Nu=2$. Так как частица 10^{-3} м достаточно крупная, то для нее $Nu \neq 2$. Для определения Nu воспользуемся зависимостью Сокольского и Тимофеевой (3-25). Используя зависимости гл. 2, по критериям Ki и Sch находим скорость витания данной частицы $w_n=2,49$ м/с, а затем критерий Рейнольдса $Re=2,49 \cdot 10^{-3}/(220 \cdot 10^{-6})=11,3$. Тогда $Nu=2+0,16 \cdot 11,3^{2/3}=2,81$.

Коэффициент диффузии рассчитывается по зависимости $D=D_0(T/T_0)^n$; принимая $D_0=0,149 \cdot 10^{-4}$ м 2 /с, а $n=1,75$, получаем $D=0,149 \cdot 10^{-4}(1400/273)^{1,75}=2,72 \cdot 10^{-4}$ м 2 /с. Тогда для частицы $\delta=5 \cdot 10^{-5}$ м получим $\alpha_D=2 \cdot 2,72 \times 10^{-4}/(5 \cdot 10^{-5})=10,86$ м/с, а для частицы 10^{-3} м $\alpha_D=2,81 \cdot 2,72 \cdot 10^{-4}/10^{-3}=0,76$ м/с; $N_i=k_i/\alpha_D$.

Для частиц заданных размеров имеем:

δ , м	N_1	N_2	N_3	N_3'	$N_1 + N_2$
10^{-3}	5,42	5,0	0,204	1,07	10,42
$5 \cdot 10^{-5}$	0,379	0,35	0,0142	0,075	0,73

Расчет парциальных давлений и потоков компонентов для частиц диаметром $5 \cdot 10^{-5}$ м необходимо проводить по схеме с негорящим пограничным слоем, так как $0,5 N_3 \rho_{\delta} \Delta < \rho_{1\Delta}$; $0,5 \cdot 0,075 \cdot 20 < 6$, а для частиц диаметром 10^{-3} м — по схеме с горящим пограничным слоем, так как $0,5 \cdot 1,07 \cdot 20 > 6$. В первом случае кислород достигает поверхности частицы и $\Delta_1/\Delta=0$. Поток углерода согласно (7-50) будет

$$G_C = \frac{10,86}{8,314 \cdot 1400} \frac{1}{(1+0,0142)(1+0,379+0,35)} \{6[0,379 \cdot (1+2 \cdot 0,0142) + 2 \cdot 0,35(1+0,0142)] + 10 \cdot 0,0142(1+0,379+0,35) + 20 \cdot 0,075(1+0,5 \times 0,379+0,0142)\} = 4,602 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кмоль}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}} = 4,602 \cdot 10^{-3} \cdot 12 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}} = 5,52 \cdot 10^{-2} \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}$$

Парциальное давление компонентов на поверхности частицы вычисляем по формулам (7-48) и (7-49):

$$p_{10} = \frac{6 - 0,5 \cdot 0,075 \cdot 20}{1 + 0,379 + 0,35} = 3,04 \text{ кПа};$$

$$p_{20} = \frac{1}{1 + 0,0142} \left[10 + \frac{0,379}{1 + 0,379 + 0,35} \cdot (6 - 0,5 \cdot 0,075 \cdot 20) \right] = 11 \text{ кПа};$$

$$p_{30} = \frac{1}{(1+0,0142)(1+0,379+0,35)} \cdot \{10 \cdot 0,0142(1+0,379+0,35) + 6[0,35 \cdot (1+0,0142) + 0,379 \cdot 0,0142] + 0,5 \cdot 20 \cdot 0,075(1+0,379+0,35)\} = 2,11 \text{ кПа}.$$

Время выгорания частицы $5 \cdot 10^{-5}$ м можно рассчитать, воспользовавшись упрощениями, приведенными в примере 7-5 ($\rho_{\text{ч}}=1200$ кг/м 3):

$$\tau = \rho_{\text{ч}} \delta_0 = 1200 \frac{8,314 \cdot 1400 \cdot 5 \cdot 10^{-5}}{2 \cdot 12 \cdot 6(4,13 + 3,8 \cdot 2)} = 0,413 \text{ с}$$

или более точно по формуле (7-11)

$$\tau = \frac{\rho_4 \delta_8}{G_C} = \frac{1200 \cdot 5 \cdot 10^{-5}}{5,52 \cdot 10^{-5}} = 1,09 \text{ с.}$$

Во втором случае (для частицы 10^{-3} м) кислород не достигает поверхности частицы и выгорание ее целиком определяется восстановительными реакциями. Поток углерода по формуле (7-46) будет

$$G_C = 0,76 / (8,314 \cdot 1400) [0,204 \cdot 10 / (1 + 0,204) + 1,07 \cdot (6 + 0,5 \cdot 20) \cdot 1 / (1 + 1,07)] = \\ = 0,651 \cdot 10^{-3} \text{ кмоль/м}^2 \cdot \text{с} = 0,78 \cdot 10^{-3} \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)},$$

Парциальные давления компонентов на поверхности частицы 10^{-3} м и относительное положение зоны горения водорода по толщине пограничной пленки вычисляем по формулам (7-46).

$$p_{20} = 10 / (1 + 0,204) = 8,31 \text{ кПа};$$

$$p_{30} = 0,204 \cdot 10 / (1 + 0,204) + 1,07 (6 + 0,5 \cdot 20) / (1 + 1,07) = 9,96 \text{ кПа};$$

$$p_{40} = (1,07 \cdot 0,5 \cdot 20 - 6) / (1 + 1,07) = 2,27 \text{ кПа};$$

$$p_{50} = (2 \cdot 6 + 20) / (1 + 1,07) = 15,46 \text{ кПа};$$

$$\frac{\Delta_1}{\Delta} = \frac{20 \cdot 1,07 - 2 \cdot 6}{(2 \cdot 6 + 20) 1,07} = 0,275.$$

Расчет полного времени выгорания такой частицы затруднен, так как G_C является довольно сложной функцией размера частицы, поэтому проинтегрировать уравнение (7-11) не удастся.

Полное время выгорания коксовой частицы фрезерного торфа диаметром 10^{-3} м, рассчитанное при помощи численного интегрирования, оказалось более 10 с. Таким образом, крупные частицы в конечной части пылеугольного факела почти не выгорают, поскольку время пребывания их в этой зоне топочной камеры котла составляет 1—2 с.

Пример 8-1. Частицы торфа после мелющего устройства попадают в систему сушки топочными газами по разомкнутому циклу, где после потери влаги на конечных участках системы некоторое время пребывают при температуре частиц, равной температуре газотопливной смеси. Определить потерю летучих с сушильным агентом по однокомпонентной схеме расчета при

температурах 673 и 573 К и времени пребывания частиц в этих условиях 0,1 и 0,5 с

Решение Из табл 8-2 (графа III) принимаем значения кинетических характеристик: $E=33,9$ МДж/кмоль (среднее значение) и $k_0=83,3$ с⁻¹. По уравнению (8-3), считая $n=1$, $C_{01}=1$ и принимая максимальный выход летучих на сухую массу торфа $V_{\text{макс}}^c=72,5$ %, для температуры 673 К при $\tau=0,1$ с получаем

$$V = 0,725 \left(1 - e^{-83,3e^{-33900} (8,314 \cdot 673) \cdot 0,1} \right) = 0,014.$$

Аналогично проводится расчет для любых моментов времени и заданных температур. Результаты расчета для условий задачи

Температура частиц, К	. . . . .	673	573
Выход летучих через 0,1 с, %	. . . . .	1,4	0,49
Выход летучих через 0,5 с, %	. . . . .	6,72	2,4

Пример 8-2. Условия задачи те же, что в примере 8-1. Определить выход летучих по двухкомпонентной схеме расчета.

Решение Из табл. 8-3 (графа III) принимаем значения кинетических характеристик: $E_1=28,1$ МДж/кмоль, $E_2=9,55$ МДж/кмоль; $k_{01}=173,3$ с⁻¹; $k_{02}=1,2$ с⁻¹; $C_{01}=0,15$, $C_{02}=0,85$ По зависимости (8-3), считая $n=2$ для температуры 673 К и $\tau=0,1$ с, получаем

$$V = 0,725 \left[0,15 \left(1 - e^{-173,3e^{-28100} (8,314 \cdot 673) \cdot 0,1} \right) + 0,85 \times \right. \\ \left. \times \left(1 - e^{-1,2e^{-9550} (8,314 \cdot 673) \cdot 0,1} \right) \right] = 0,025.$$

Результаты расчета для заданных условий:

Температура частиц, К	. . . . .	673	573
Выход летучих через 0,1 с, %	. . . . .	2,5	1,5
Выход летучих через 0,5 с, %	. . . . .	11,0	7,1

Пример 8-3. Частица сухого торфа с начальной температурой 273 К падает в инертную среду с температурой 1100 К и нагревается до температуры среды со средней скоростью 490 К/с ($T=273+490\tau$). Определить зависимость выхода летучих от времени, пользуясь однокомпонентной схемой расчета (неравномерностью прогресса по толщине частицы можно пренебречь).

Решение. Из табл. 8-2 получаем значения кинетических характеристик: $E=29\,300$ кДж/кмоль; $k_0=83,3$ с⁻¹; $V_{\text{макс}}=72,5$ %. По зависимости (8-4) определяем выход летучих к заданному моменту времени τ

$$V = 0,725 \left\{ 1 - \exp \left[- \int_0^{\tau} 83,3e^{-\frac{29\,300}{8,314(273+490\tau)}} d\tau \right] \right\}.$$

Обозначим символом I интеграл в показателе степени e По зависимости (8-5) через $\tau=0,1$ с

$$I = \frac{83,3 \cdot 29\,300}{2,303 \cdot 8,314 \cdot 490} \left[H \left(\frac{2,303 \cdot 8,314 \cdot 322}{29\,300} \right) - H \left(\frac{2,303 \cdot 8,314 \cdot 273}{29\,300} \right) \right] = \\ = 260,1 [H(0,2104) - H(0,1784)] = 260,1 (4,3 \cdot 10^{-7} - 0,92 \cdot 10^{-7}) = 8,79 \cdot 10^{-6}; \\ V = 0,725 (1 - e^{-8,79 \cdot 10^{-6}}) \approx 0.$$

Через $\tau=1,5$ с

$$I = 260,1 [H(0,657) - H(0,178)] = 260,1 (0,39 \cdot 10^{-2} - 0,92 \cdot 10^{-7}) = 1,014;$$

$$V = 0,725 (1 - e^{-1,014}) = 0,46.$$

Результаты расчета в интервале времени 0,1—1,5 с приведены ниже (и на рис. 8-8):

Время, с	0,1	0,2	0,47	0,647	0,885	1,245	1,5
Выход летучих, % сухой массы . .	0	0	0,5	2,2	8,0	25,0	46,0

Из графика на рис. 8-8 видно, что при $\tau=1,5$ с, когда температура частицы уже близка к температуре среды, выход летучих составляет всего 46 % (при максимальном 72,5 %).

Пример 8-4. При начальных условиях, приведенных в примере 8-3, из торфа через 1,25 с выделяется примерно 25 % летучих (в расчете на сухую массу). Определить состав продуктов термоллиза.

Решение. По данным графика на рис. 8-1 выход летучих 25 % (полукокса 0,75 %) соответствует условной температуре примерно 553 К. Этой температуре соответствует выход (в процентах на сухую массу исходного торфа): воды разложения 13,1; кислоты 1,2; смолы 3; CO_2 7; CH_4 0,2; C_nH_m следы; CO 0,4; H_2 следы. Итого 24,9 % ≈ 25 %.

Состав летучих: $\text{H}_2\text{O} = \frac{13,1}{24,9} = 52,5$ %; кислоты 4,9 %; смолы 12,1 %; CO_2 28,1 %; CH_4 0,8 %; CO 1,6 %; всего 100 %.

Таким образом, в нашем примере выделившиеся летучие весьма низкокалорийны, так как забалластированы значительным количеством CO_2 и H_2O (в сумме около 80 %).

Пример 8-5. Аэрозвесь мелких частиц торфа продувается через трубчатую печь с температурой среды (инертной), равной 873 К; скорость частиц топлива и смеси летучих и среды в реакционной зоне составляет: $\omega_\tau = 0,5$ м/с; $\omega_\pi = 0,4$ м/с. Определить выход смолы, улавливаемой после печи, при длине реакционной зоны $x=0,2$ м и $x=1$ м. Предполагается, что нагрев частиц до температуры среды происходит практически мгновенно.

Решение. По табл. 8-3 (графа III) принимаем, что кинетика процесса образования смолы определяется значениями: $E=9550$ кДж/кмоль; $k_0=1,2$ с⁻¹. Из табл. 8-4, считая, что кинетика процесса термического разложения смолы определяется значениями кинетических характеристик для фенола, получаем $E=139\,800$ кДж/моль; $k_{0p}=3,16 \cdot 10^7$ с⁻¹.

Максимальный выход смолы из торфа принимаем по данным квазистатического выхода (см. рис. 8-1); экстраполируя эти данные до более высоких температур, получаем $V_{\text{макс. см}}=10$ %. По зависимости (8-2) определяем константы скорости образования и вторичного разложения смолы:

$$k = 1,2e^{-9550:(8,314 \cdot 873)} = 0,322 \text{ с}^{-1};$$

$$k_p = 3,16 \cdot 10^7 e^{-139\,800:(8,314 \cdot 873)} = 0,135 \text{ с}^{-1}.$$

Далее по формуле (8-9) для $x=0,2$ м вычисляем

$$\frac{V}{V_{\text{макс. см}}} = \frac{0,322 : 0,5}{0,135 : 0,4 - 0,322 : 0,5} \left(e^{-0,322 \cdot 0,2 : 0,5} - e^{-0,135 \cdot 0,2 : 0,4} \right) = 0,115;$$

для $x=1$ м

$$\frac{V}{V_{\text{макс. см}}} = \frac{0,322 : 0,5}{0,135 : 0,4 - 0,322 : 0,5} \left(e^{-0,322 \cdot 1,0 : 0,5} - e^{-0,135 \cdot 1,0 : 0,4} \right) = 0,392.$$

Пример 9-1. Определить механическую неполиоту сгорания пыли каменного угля марки ГСШ в топке с сухим шлакоудалением. Объем топки $V_T = 25\,160 \text{ м}^3$; сечение топки $F_T = 479 \text{ м}^2$; расход топлива $B = 104,6 \text{ кг/с}$; характеристики размола $R_{200} = 8,5 \%$; $R_{90} = 30 \%$; коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1,24$; теоретическая температура горения $T_a = 2198 \text{ К}$; температура на выходе из топки $T_T'' = 1366 \text{ К}$. Теплота сгорания топлива $Q_H^P = 19,8 \text{ МДж/кг}$; влажность топлива $W^P = 11 \%$; зольность топлива $A^P = 26,7 \%$; содержание летучих в топливе, приходящееся на горючую массу, $V^r = 40 \%$; количество воздуха, теоретически необходимое для сжигания 1 кг топлива (при $\alpha = 1$), $V^0 = 5,19 \text{ м}^3/\text{кг}$; теоретический объем газов, образующихся при сгорании 1 кг топлива, $V_r^0 = 5,65 \text{ м}^3/\text{кг}^*$. Средний состав топочных газов (в молярных долях): $x_{O_2} = 0,1$; $x_{CO_2} = 0,11$; $x_{N_2} = 0,79$.

Решение. Определим выход летучих на рабочую массу (см. § 1-2) и объем продуктов сгорания (V_r) при действительном количестве воздуха α (см. § 1-3):

$$V^P = V^r \frac{100 - A^P - W^P}{100} = 40 \frac{100 - 26,7 - 11}{100} = 24,92 \%$$

$$V_r = 5,65 + 1,0161 \cdot (1,24 - 1) \cdot 5,19 = 6,92 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

По выражению (9-3) найдем $K^P = 1 - (11 + 26,7 + 24,92)/100 = 0,374$.

Принимая для топки с сухим шлакоудалением $Z_{\text{ж}}=0,25$, при $\theta_{\tau}^* = =1366/2198=0,62$ по графику на рис. 9-13 находим $Q_{\phi}=0,74$, т. е. $T_{\phi}= =0,74 \cdot 2198=1627$ К. По формуле (9-37) среднее время пребывания продуктов сгорания в топке

$$\tau_r = \frac{25\ 160}{104,6 \cdot 6,92 \cdot 1627/273} = 5,83 \approx 5,8 \text{ с.}$$

При $R_{200}=8,5\%$ и $R_{90}=30\%$ по графику, аналогичному графику на рис. 9-4, получаем $n=\text{tg } \alpha=0,9$. Тогда по выражению (9-8) $b = \left(\frac{1}{90}\right)^{0,9} \times$

$\times \ln \frac{1}{0,3} = 0,02098$ и по соотношению (9-17) $\delta_{01} = (6,9/0,02098)^{1/0,9} = 626$ мкм.

Приведенным в условии примера значениям R_{90} и R_{200} отвечает выражение $R_{01} = \exp(-0,02098 \delta_{01}^{0,9})$; при $\delta_{01} = \delta_{01} = 626$ мкм получаем $R_{01} = 0,001 = =0,1\%$.

Для определения критерия Nu_D для самой большой частицы ($\delta_{01} = =626$ мкм) необходимо предварительно вычислить скорость витания этой частицы и соответствующий ей критерий Рейнольдса. Принимая для каменного угля $\gamma_4 = 1200$ кг/м³, для газового потока $\gamma_0 = 1,293 \cdot \frac{273}{1627} = 0,217$ кг/м³, а кинематическую вязкость (по таблицам) $\nu = 247 \cdot 10^{-6}$ м²/с, находим критерий Кирпичева (см. § 2-6):

$$\text{Ki} = 626 \cdot 10^{-6} \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 9,81 \cdot (1200 - 0,217)}{3 \cdot 0,217 (247 \cdot 10^{-6})^2}} = 6,626.$$

Так как $\text{Ki} < 8,5$, то по выражению (2-12)

$$\text{Sch} = \frac{6,626^2}{24 (1 + 0,955 \cdot 10^{-3} \cdot 6,626^4)^{0,375}} = 1,237.$$

Тогда

$$\omega_B = \frac{1,237}{\sqrt[3]{\frac{3 \cdot 0,217}{4 \cdot 9,81 \cdot 1200 \cdot 247 \cdot 10^{-6}}}} = 3,23 \text{ м/с.}$$

Критерий Рейнольдса $\text{Re} = 3,23 \cdot 626 \cdot 10^{-6} / (247 \cdot 10^{-6}) = 8,19 \approx 8,2$. Принимая по таблицам при $T_{\phi} = 1627$ К для продуктов сгорания среднего состава $\text{Pr} = 0,55$, по выражению § 3-7 получим $\text{Nu}_D = 2 + 0,03 \cdot 0,55^{0,33} \cdot 8,2^{0,54} + 0,35 \times \times 0,55^{0,36} \cdot 8,2^{0,6} = 3,596 \approx 3,6$.

Для введения поправки на отставание наиболее крупных частиц кокса от потока газов определим по выражению (9-39) среднюю скорость топочных газов

$$\omega_{\tau, r} = \frac{6,92 \cdot 104,6 \cdot 1627}{479 \cdot 273} = 9,01 \text{ м/с.}$$

Тогда по (9-38) время полного пребывания частиц кокса в топке составит

$$\tau = 5,8 \frac{9,01}{9,01 - 3,23} = 9,04 \approx 9 \text{ с.}$$

При $T_{\phi} = 1627$ К константа скорости горения

$$k_1 = 1,9 \cdot 10^4 \exp\left(-\frac{125,6 \cdot 10^3}{8,31 \cdot 1627}\right) = 1,755 \approx 1,75 \text{ м/с.}$$

Принимая давление в топке $P_T = 9,81 \cdot 10^4$ Па, определим по выражениям (9-19) и (9-20) соответственно параметры β и a :

$$\beta = \frac{1200}{2} \cdot \frac{6,92}{22,4} \cdot \frac{8,31 \cdot 10^3 \cdot 1627}{9,81 \cdot 10^4} \cdot \frac{1}{0,374} = 6,83 \cdot 10^4;$$

$$a = (1,24 - 1) \cdot \frac{5,19}{8,89} \cdot \frac{1}{0,374} \approx 0,37.$$

Определим коэффициент диффузии кислорода в газах. Изменением коэффициента диффузии при изменении состава газов будем пренебрегать ввиду приближенности расчета выгорания факела. По данным гл. 3 примем следующие коэффициенты взаимной диффузии при нормальных условиях ($P_0 = 9,81 \cdot 10^4$ Па, $T_0 = 273$ К):

$$D_{O_2-CO_2} = 0,139 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}; \quad D_{O_2-N_2} = 0,184 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Принимая $n=1,75$ и считая, что давление в топке равно атмосферному, получим

$$D_{O_2-CO_2} = 0,139 \cdot 10^{-4} \left(\frac{1627}{273} \right)^{1,75} = 3,16 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с};$$

$$D_{O_2-N_2} = 0,184 \cdot 10^{-4} \left(\frac{1627}{273} \right)^{1,75} = 4,18 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Коэффициент диффузии кислорода в топочных газах по выражению (3-13) определяется как

$$D_{O_2-\text{смесь}} = \frac{1 - 0,1}{\frac{0,11}{3,16 \cdot 10^{-4}} + \frac{0,79}{4,18 \cdot 10^{-4}}} = 4,02 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Теперь находим значение комплекса $k_1/a_{D_{O_2}} = k_1 \delta_{O_2} / (Nu_D D)$, определяющее область горения частицы размером δ_{O_2} :

$$\frac{k_1 \delta_{O_2}}{Nu_D D} = \frac{1,75 \cdot 626 \cdot 10^{-6}}{3,6 \cdot 4,02 \cdot 10^{-4}} = 0,757 \approx 0,76.$$

Следовательно, выгорание наиболее крупных частиц протекает в промежуточной области с преобладающим влиянием кинетических факторов. Поэтому для расчетов необходимо использовать номограммы для промежуточной области при $Nu_D D / (k_1 \delta_{O_2}) = 1$ (см. рис. 9-11) и для кинетической области $k_1 \delta_{O_2} / (Nu_D D) = 0$ (см. рис. 9-10). Предварительно определим значение комплекса $k_1 \tau / (\beta \delta_{O_2}) = I_2(x)$:

$$I_2(x) = \frac{1,75 \cdot 9}{6,84 \cdot 10^4 \cdot 626 \cdot 10^{-6}} = 0,368 \approx 0,37.$$

Для определения $I_1(x)$ необходимо графически построить зависимость $I_2(x) = k_1 \tau / (\beta \delta_{O_2}) = f[k_1 \delta_{O_2} / (Nu_D D)]$ при $n=0,9$; $a=0,37$ и разных $I_1(x)$. Зна-

Таблица 9-1

Значение $I_1(x)$	Значение $I_2(x)$ при		
	$k_1 \delta_{O_2} / (Nu_D D) = 0$	$Nu_D D / (k_1 \delta_{O_2}) = 1$	$k_1 \delta_{O_2} / (Nu_D D) = 0,76$
0,03	0,32	0,42	0,39
0,04	0,26	0,37	0,34

чение $I_1(x)$, при котором $I_2(x)$, найденное графически для $k_1/\alpha_{D01}=0,76$, будет соответствовать расчетному $I_2(x)=0,37$ и является искомым. Результаты сведены в табл. 9-1.

Как видно из таблицы, полученное $I_2(x)$ наиболее близко к расчетному значению $I_2(x)=0,37$ при $I_1(x)=0,03$. Окончательно $I_1(x)=0,034$.

Из выражении (9-33) для рассматриваемых условий находим

$$q_4 = 0,374 \cdot 0,034 \cdot \frac{33,913}{19,8} = 0,0218 \approx 2,2\% .$$