

ПРИМЕРЫ

Пример 10-1. Убедиться, что если температурный уровень в зоне выгорания кокса составляет в среднем 2000 К, то горение углерода кокса антрацита протекает в диффузионной области по схеме горящего слоя. Средний размер сжигаемых частиц топлива $\delta=0,05$ м. Форсировка процесса горения характеризуется скоростью фильтрации воздуха 5 м/с.

Решение. Необходимо доказать, что при заданных условиях $N_1 \gg 1$ и $N_2 \gg 1$, а также $Se \gg 0,4$. Для нахождения кинетических констант будем пользоваться величинами, полученными в § 7-3: $E_1=135$ кДж/моль; $k_{01}=6,7 \cdot 10^4$ м/с; $E_2=1,1 E_1=154$ кДж/моль; $k_{02}=1,25 \cdot 10^5$ м/с; $E_3=2,2 E_1=304$ кДж/моль; $k_{03}=1,58 \cdot 10^8$ м/с; $E_4=94,5$ кДж/моль; $k_{04}=7,03 \cdot 10^8$ с⁻¹. Тогда при заданной температуре процесса по формуле Аррениуса $k_1=14,4$ м/с; $k_2=11,3$ м/с; $k_3=0,15$ м/с; $k_4=22,6 \cdot 10^3$ м/с. Для определения коэффициентов диффузии воспользуемся приближенной зависимостью $D=D_0 (P_0/P_T) (T/T_0)^{1,75}$. Тогда $D_{O_2-CO_2-N_2} \approx 5,8 \cdot 10^{-4}$ м²/с; $D_{CO-CO_2-N_2} \approx 4,5 \cdot 10^{-4}$ м²/с. Для указанных условий можно принять $\nu \approx 300 \cdot 10^{-8}$ м²/с. Тогда $Re_{сл} = \omega \delta / \nu \approx 830$ и $Nu_D = 0,08 Re \approx 60$. Зная, что $Nu_D = \alpha_D \delta / D$, найдем α_D , а затем нетрудно найти и $N_1 \approx 20,3$; $N_2 = 16$. Теперь можно определить и критерий Семенова $Se = \sqrt{k_4 D} / \alpha_D = 5,2$.

Полученные результаты подтверждают, что горение протекает в диффузионной области по схеме двойного горящего пограничного слоя.

Таблица 10-1

Расчетные значения полной высоты слоя и высоты зон для различных законов изменения порозности по высоте ($\alpha_{сл} = 0,9$ $\delta_{01} = 50$ мм)

Характер слоя	$h_{\text{поли}}$ мм	$h_{\text{к. з}}$ мм	$h_{\text{восст}}$ мм
Полифракционный с переменной порозностью	270	100	170
Полифракционный с постоянной порозностью	130	105	25
Монофракционный	95	80	25

Пример 10-2. Определить необходимую полную высоту слоя и высоту, соответствующую концу кислородной зоны прямоточного слоя, если на выходе из слоя необходимо поддерживать $\alpha_{с.л} = 0,9$. Сжигается топливо с $\delta_{01} = 50$ мм; $m_0 = 0,5$. Сравнить, как изменится необходимая полная высота слоя и размеры зон в зависимости от закона изменения порозности.

Решение Воспользуемся результатами интегрирования уравнений выгорания, представленными на рис. 10-6. Находим, что для $\alpha_{с.л} = 0,9$ имеем значения комплексов $(1 - m_0)\xi_{полн}$ и $(1 - m_0)\xi_{к.з}$ соответственно:

слой с переменной порозностью	2,7	0,7
слой с постоянной порозностью	1,3	1,05
монофракционный слой ($m = const$)	0,95	0,8

Зная, что $(1 - m_0)\xi_{полн} = \frac{H_{полн}}{\delta_{01}}(1 - m_0)$, а $(1 - m_0)\xi_{к.з} = \frac{H_{к.з}}{\delta_{01}}(1 - m_0)$

и используя заданные значения δ_{01} и m_0 , вычислим полную высоту слоя и высоту зон (табл. 10-1).

Пример 11-1. Рассчитать время прогрева холодных капель жидкого топлива до достижения на их поверхности температуры кипения. Капли впрыскиваются в поток горячих газов с температурой 1470 К, давление атмосферное.

Решение. Из-за сильной зависимости давления насыщенных паров от температуры можно практически пренебречь испарением при температурах, меньших температуры кипения (давление паров будет низко по сравнению с давлением при температуре кипения). В таком случае для расчета прогрева можно использовать известные решения или графики (например, графики Гребера) для прогрева твердых шаров.

Примем, что температура кипения жидкого топлива при атмосферном давлении составляет 470 К (соляровое масло), а плотность жидкости $\rho_{ж} = 900 \text{ кг/м}^3$. Для теплопроводности жидкости $\lambda_{ж}$, ее удельной теплоемкости $c_{ж}$ и теплопроводности газов $\lambda_{г}$ можно принять следующие ориентировочные значения: $\lambda_{ж} = 0,12 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$; $c_{ж} = 2,1 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$; $\lambda_{г} = 0,07 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$.

Пусть капли жидкости движутся вместе с потоком и можно принять $Nu=2$. Критерий Био $Bi = \frac{\alpha \delta / 2}{\lambda_{ж}} = \frac{Nu}{2} \frac{\lambda_{г}}{\lambda_{ж}} = 0,06/0,1 = 0,6$. Как следует из формул теплопередачи, при малом критерии Био * ($Bi < 1$) время прогрева до достижения шаром температуры T

$$\tau = \frac{(\delta/2)^2}{3Bi a_{ж}} \ln \frac{\theta_0}{\theta},$$

где $a_{ж}$ — температуропроводность тела (в данном случае жидкости); $a_{ж} = \lambda_{ж}/(\rho_{ж} c_{ж})$; $\theta = T - T_{ср}$ и $\theta_0 = T_0 - T_{ср}$; T_0 и $T_{ср}$ — начальная температура шара и температура окружающей газовой среды.

При выбранных значениях физических величин и $T_0 = 290$ К, $T_{ср} = 1470$ К получаем $\tau = 0,036 \delta^2$, с, если δ в мм. Для различных δ значения времени прогрева следующие:

δ , мм	0,01	0,1	1	2
τ , с	$3,6 \cdot 10^{-6}$	$3,5 \cdot 10^{-4}$	$3,6 \cdot 10^{-2}$	$1,4 \cdot 10^{-1}$

Как видим, значения времени прогрева небольшие, они невелики по сравнению со значениями времени испарения (см. следующий пример), и поэтому ими можно пренебречь.

Пример 11-2. Рассчитать время испарения капле солярового масла в газовом потоке с температурой 1470 К (давление атмосферное).

Решение. Для расчета испарения капле можно воспользоваться формулой (11-10), приняв для K соотношение (11-11) с заменой температуры горения $T_{г}$ на температуру среды $T_{ср}$. Для солярового масла можно принять $r_{исп} = 210$ кДж/(кг · К), а удельную теплоемкость паров $c_{рп} \approx 1,68$ кДж/(кг · К). При использовании соотношения (11-3) для нахождения $\Phi(T_{ср}, T_{кип})$ получаем $K = 0,8$ мм²/с. Полное время испарения $\tau = \delta_0^2 / K = 1,25 \delta_0^2$, с, если δ_0 в мм. Для различных δ_0 расчетные значения времени испарения следующие:

δ_0 , мм	0,01	0,1	1	2
τ , с	$1,25 \cdot 10^{-4}$	$1,25 \cdot 10^{-2}$	1,25	5

Время испарения капле приблизительно в 35 раз больше времени их прогрева до температуры кипения. Существенно и то, что для мелких капле время испарения невелико по сравнению с возможным временем пребывания их в топочной камере (последнее не меньше 10^{-2} — 10^{-1} с) **. Мелкие капли, как уже отмечалось, успевают полностью испариться перед воспламенением (или в зоне воспламенения).

Следует также отметить, что расход теплоты на перегрев паров у поверхности капле весьма существенно уменьшает скорость испарения. Если пренебречь расходом теплоты на перегрев паров, то вместо (11-3) получим

$$\Phi(T_{ср}, T_{кип}) = \int_{T_{кип}}^{T_{ср}} \frac{\lambda dT}{r_{исп}} = \frac{\lambda}{r_{исп}} (T_{ср} - T_{кип}).$$

Тогда при принятых условиях расчет дает $K = \frac{4}{\rho_{ж}} Nu \Phi(T_{ср}, T_{кип}) \approx 3$ мм²/с, в то время как с учетом перегрева паров $K \approx 0,8$ мм²/с. При этом величина $r_{исп}/c_{рп} = 125$ К составляет только 12,5 % разности температур $T_{ср} - T_{кип} = 1000$ К. Из-за перегрева даже при данных условиях сильно изменяется температурная кривая, градиент температур у поверхности капле,

а следовательно, и тепловой поток, подходящий к поверхности капли, очень заметно уменьшается (в 3,7 раза).

Пример 11-3. Рассчитать изменение размера капель солярового масла и их массы (по всем каплям) при испарении в среде с температурой 1470 К (давление атмосферное) в случае полидисперсного распыла.

Решение. Как видно из формулы (11-9), для капель разных фракций с текущими размерами δ_i и δ_1 можно записать $d(\delta_i^2) = d(\delta_1^2)$. Следовательно, соотношение между размерами капель разных фракций при их совместном испарении такое же, как и между частицами твердого топлива разных фракций при диффузионном горении. Используя методику, применяемую при расчете выгорания полидисперсного пылеугольного факела, можем записать для текущей массы капель, приходящейся на 1 кг исходного топлива, следующее выражение (в кг/кг):

$$G = m n \int_{(1-x)^{1/2}}^1 \frac{e^{-m y^n}}{y^{4-n}} [y^2 - (1-x)^2]^{3/2} dy = I_1(x),$$

где $x = \delta_i / \delta_{01}$ — текущий относительный диаметр наиболее крупной капли; $y = \delta_{0i} / \delta_{01}$ — отношение начального размера капли промежуточной фракции к начальному размеру наиболее крупной капли; m и n — как и раньше, величины, характеризующие полидисперсность (причем $m = b \delta_{01}^n$, где b — коэффициент, входящий в закон Розина — Раммлера $R = e^{-b \delta_{0i}^n}$).

Если принять $m = 4,6$, т. е. считать, что относительная масса капель с начальным диаметром δ_{01} составляет 1%*, то, как показывают численные расчеты интеграла $I_1(x)$,

$$G = A e^{c x^2},$$

где A и c практически зависят только от параметра n .

Если, например, $n = 2,5$, как это часто бывает для центробежных форсунок, то $G = 2 \cdot 10^{-4} e^{8,5 x^2}$. Используем для расчетов это выражение. Пусть $n = 2,5$ и $\delta_{01} = 100$ мкм = 0,1 мм. Текущее значение $\delta_1^2 = \delta_{01}^2 - K \tau$.

Аналогичным образом рассчитывается изменение диаметра капель других фракций. Определяя изменение квадрата относительного размера условной наиболее крупной капли x^2 , находим изменение G во времени. По данным предыдущего примера для рассматриваемых условий можно взять $K = 0,8$ мм²/с. При вычислениях считаем, что капля в потоке относительно немого и, следовательно, температура потока при испарении падает незначительно.

Результаты расчетов сведены в табл. 11-1.

Величина G сравнительно быстро уменьшается и становится малой еще при больших значениях δ_1 (или x). Уменьшение G связано с испарением более мелких капель.

Пример 11-4. Рассчитать время диффузионного сгорания капель солярового масла.

Решение. Расчет не отличается от расчета времени испарения (пример 11-2), но необходимо повысить коэффициент K (в данном случае — коэффициент горения). Если оценочно принять $K = 1,15$ мм²/с, то для различных начальных диаметров капли δ_0 получаются следующие значения времени сгорания:

δ_0 , мм	0,01	0,1	1	2
τ , с	$0,9 \cdot 10^{-4}$	$0,9 \cdot 10^{-2}$	0,9	3,5

Можно также рассчитать диффузионное горение капель в прямоточном полидисперсном факеле (поступая, как в предыдущем примере). Однако, как

Результаты расчета испарения солярового масла
(температура среды 1470 К, давление атмосферное,
показатель полидисперсности $n = 2,5$)

Обозначение величины	Значение величины при τ , с. равном					
	$0,5 \cdot 10^{-4}$	$1,25 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$3,1 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$1,25 \cdot 10^{-2}$
δ_1 , мм, при $\delta_{01} = 0,1$ мм	0,1	0,1	0,096	0,087	0,077	0
δ_2 , мм, при $\delta_{02} = 0,05$ мм	0,05	0,049	0,041	0	—	—
δ_3 , мм, при $\delta_{03} = 0,01$ мм	0,008	0	—	—	—	—
x^2	1	1	0,92	0,75	0,6	0
G , кг/кг	1	1	0,5	0,11	0,032	0*

* Для малых G расчет по соотношению $G = 2 \cdot 10^{-4} e^{8,5x^2}$ становится неточным. При $x^2 = 0$ вместо $G = 0$ получается $G = 2 \cdot 10^{-4}$.

уже говорилось, подобный расчет реального закрученного (неоднородного) факела затруднителен.

Пример 11-5. Сравнить скорость диффузионного горения капли жидкого топлива со скоростью диффузионного горения частицы угля (кокса) в сопоставимых условиях.

Решение. Для расчета диффузионного горения частицы угля используем соотношение (7-10), подставляя значение G_c , отвечающее горению в диффузионной области: $d\delta/d\tau = -(2\beta\alpha_D C_{O_2})/\rho_k$, где β — стехиометрический коэффициент; C_{O_2} — концентрация кислорода; ρ_k — плотность кокса.

Поскольку $\alpha_D = Nu_D/\delta$, то приведенное соотношение можно переписать так:

$$d\delta^2/d\tau = -4Nu_D\beta DC_{O_2}/\rho_k.$$

Это выражение можно сопоставить с соответствующим выражением для диффузионного горения капли. Видно, что коэффициент горения капли K заменяется величиной $(4Nu_D\beta DC_{O_2})/\rho_k$. Сопоставление значений K и данной величины позволяет сравнить скорости диффузионного горения капель жидкого топлива и частиц угля.

При сгорании в воздушной атмосфере с температурой 2273 К концентрация кислорода равна $0,21 P M_{O_2}/(RT) = 0,21 \cdot 10^5 : (260 \cdot 2273) = 3,5 \cdot 10^{-2}$ кг/м³; здесь $P = 10^5$ Па — общее давление; $R/M_{O_2} = 8,31 \cdot 10^3/32 = 260$ Дж/(кг·К) — газовая постоянная для кислорода. Если C_{O_2} выражать в кг/м³ и считать, что сгорание углерода протекает до образования CO_2 , то стехиометрический коэффициент $\beta = 12/32$. Коэффициент диффузии кислорода в продуктах сгорания при температуре 2273 К приблизительно равен 8 см²/с. При $Nu_D = 2$ и $\rho_k = 1500$ кг/м³ получаем $4Nu_D\beta DC_{O_2}/\rho_k \approx 0,05$ мм²/с. Эта величина в 20—30 раз меньше коэффициента горения K для капель жидкого топлива. Во столько же раз время полного сгорания частицы угля в диффузионной области больше времени диффузионного горения капли жидкого топлива (при одинаковых начальных размерах).