

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ**

**«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ РАСТИТЕЛЬНЫХ
ПОЛИМЕРОВ»**

**Кафедра охраны окружающей среды и рационального использования
природных ресурсов**

Теоретические основы очистки и обезвреживания выбросов

**Методическое пособие
для выполнения контрольных работ**

**Факультет заочный
Специальность – 280201 «Охрана окружающей среды и рациональное
использование природных ресурсов»**

Санкт-Петербург

2011

УДК 502.3 (075)

Теоретические основы очистки и обезвреживания выбросов: методическое пособие для выполнения контрольных работ / сост. Т.И. Буренина, Л.Н. Григорьев, О.А. Шанова, И.А.Крашенинникова; СПбГТУРП. – СПб., 2011. - 20 с.

Методическое пособие состоит из контрольных вопросов и задач в соответствии с рабочей программой дисциплины «Теоретические основы очистки и обезвреживания выбросов и сточных вод».

Предназначается для студентов заочной формы обучения по специальности 280201 «Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов»

Рецензенты: профессор кафедры охраны окружающей среды и рационального использования природных ресурсов СПбГТУРП, канд. техн. наук Л.М. Исянов.

Подготовлено и рекомендовано к печати кафедрой охраны окружающей среды и рационального использования природных ресурсов СПбГТУРП (протокол № 8 от 06.06.11).

Утверждено к изданию методической комиссией инженерно-экологического факультета СПбГТУРП (протокол № 2 от 06.06.11).

© Буренина Т.И., Григорьев Л.Н.,
Шанова О.А., Крашенинникова И.А.

© Санкт-Петербургский
государственный технологический
университет растительных полимеров, 2011

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Напишите формулы для расчета силы сопротивления газообразной среды движению частиц для случаев разделения дымовых газов, пылей, а также туманов с медианным размером капелек $d_m = 5$ мкм.
2. Как рассчитать размеры пылеосадительной камеры?
3. Проанализируйте влияние диаметра циклона на размеры улавливаемых частиц.
4. Какие тела простой формы являются более высокоэффективными поверхностями осаждения и почему?
5. Дайте определение пылеемкости фильтровальных материалов.
6. Объясните условия, при которых возникает коронный разряд.
7. Поясните, что обозначают величины $U_{кр.}$, U_p , $U_{пр.}$.
8. Поясните, что обозначают величины $m_{ух.}$, m_c , $m_{рх.}$.
9. Укажите, от каких параметров зависит удельный расход абсорбента.
10. В чём состоит физический смысл параметра $N_{ог}$, $N_{сх}$.
11. Напишите и поясните уравнение аддитивности фазовых сопротивлений при хемосорбции.
12. Напишите и поясните уравнение аддитивности фазовых сопротивлений при физической абсорбции.
13. Дайте оценку моделей абсорбции.
14. Перечислите и опишите типы изотерм адсорбции.
15. Напишите и поясните уравнение аддитивности фазовых сопротивлений при адсорбции.
16. Что такое выходная кривая адсорбции и каково ее значение?
17. Приведите основные положения теорий каталитического дожигания выбросов.
18. Рассмотрите лимитирующие стадии каталитического дожигания. В чём состоит их значение?
19. Каковы требования к катализаторам? Что такое «отравление катализатора»?
20. Опишите метод термического обезвреживания выбросов и область его применения.

ВАРИАНТЫ ЗАДАЧ

Примечание к задачам: номер варианта совпадает с последней цифрой в номере зачетной книжки.

Для выполнения задач №№ 1-8 используется литература [1].

1. Определить скорость осаждения частиц под действием силы тяжести, используя формулы 1.11 или 1.12 [1], при следующих условиях

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Размер частицы, d_p , мкм	30	25	40	70	48	20	100	10	16	92
Плотность частицы, ρ_p , кг/м ³	2000	3400	2600	1200	1800	1600	2400	2200	1800	3000
Вязкость газа, μ_r , Па·с	$20 \cdot 10^{-6}$	$18 \cdot 10^{-6}$	$20 \cdot 10^{-6}$	$17 \cdot 10^{-6}$	$20 \cdot 10^{-6}$	$19 \cdot 10^{-6}$	$20 \cdot 10^{-6}$	$17 \cdot 10^{-6}$	$20 \cdot 10^{-6}$	$18 \cdot 10^{-6}$

2. Определить эффективность улавливания частиц, используя формулы 1.19, 1.20 [1], при следующих условиях

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
d_m , мкм	30	25	40	70	48	20	100	10	16	92
σ_p	3,5	2,0	3,0	2,5	2,7	3,4	2,9	3,2	2,2	3,0
d_{50} , мкм	4,5	2,3	4,5	8,5	8,5	1,95	8,5	1,13	1,13	6,0
$\lg \sigma_\eta$	0,33	0,36	0,35	0,31	0,31	0,31	0,31	0,34	0,34	0,28

3. Рассчитать степень очистки газов в электрофильтре по формулам 1.57 и 1.62 [1], используя соотношение:

$E = U/h$, где E - напряженность поля; U - напряжение; h - расстояние между электродами;

$$U = 50 \text{ кВ};$$

$$\mu_r = 22,2 \cdot 10^{-6} \text{ Па·с};$$

$$W_r = 1 \text{ м/с}.$$

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
L , м	2,0	2,5	3,0	3,5	2,5	3,0	2,0	3,5	2,5	2,0
d_p , мкм	1,5	6,0	1,8	5,5	2,2	5,0	2,7	4,5	3,3	4,0
H , м	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20

4. Рассчитать скорость осаждения частиц по формуле 1.11 [1] и определить размеры пылеосадительной камеры, используя формулу 1.13 [1]. Соотношение длины камеры (L, м) и высоты (H, м) принять равным 3.

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Размер частицы, $d_{ч}$, мкм	25	30	40	15	20	45	48	58	60	35
Плотность частицы, $\rho_{ч}$, кг/м ³	2000	3400	1800	2200	3800	2850	2460	2580	2950	3000
Вязкость газа, $\mu_{г}$, Па·с	$20 \cdot 10^{-6}$	$20 \cdot 10^{-6}$	$20 \cdot 10^{-6}$	$20 \cdot 10^{-6}$	$20 \cdot 10^{-6}$	$20 \cdot 10^{-6}$	$20 \cdot 10^{-6}$	$20 \cdot 10^{-6}$	$20 \cdot 10^{-6}$	$20 \cdot 10^{-6}$

5. Рассчитать коэффициент массоотдачи загрязняющего вещества (ЗВ) в газовой фазе при абсорбции (удельная поверхность $f - 110 \text{ м}^2/\text{м}^3$, давление $P=10^5 \text{ Па}$, температура абсорбции – $t = 25^\circ\text{C}$).

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Объёмный расход газового потока, тыс. м ³ /ч	30	40	25	60	90	100	35	150	130	10
Объём абсорбера, м ³	17,5	18,0	16,8	18,1	28,4	34,8	21,5	48,0	42,0	9,0
Константа фазового равновесия, $m_c \cdot 10^3$	0,36	0,024	0,372	$6 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	0,36	0,07	0,024	0,372	$2 \cdot 10^{-4}$
Концентрация ЗВ, г/м ³	1,0	1,8	0,5	1,2	0,3	0,85	0,9	1,4	4,0	0,8
Время обновления поверхности, с · 10 ³	0,5	1,0	0,7	8,0	10,0	12,0	0,9	8,0	15,0	0,6
ЗВ	H ₂ S	SO ₂	NO ₂	NH ₃	HCl	H ₂ S	Cl ₂	SO ₂	NO ₂	HF
Эффективность очистки, %	90,0	92,0	65,0	80,0	70,4	85,0	78,0	90,0	80,0	94,0

Примечание: в расчетах значения $\bar{c}_{ж0}$, $\bar{c}_{жк}$ принять вариант 1-3 ($\bar{c}_{ж0} = 1 \text{ г/л}$, $\bar{c}_{жк} = 0$); вариант 4-7 ($\bar{c}_{ж0} = 0,1 \text{ г/л}$, $\bar{c}_{жк} = 0$); вариант 8-10 ($\bar{c}_{ж0} = 0,2 \text{ г/л}$, $\bar{c}_{жк} = 0$).

6. Определить величину адсорбции ЗВ в равновесных условиях.

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Температура адсорбции, К	303	308	298	300	353	310	305	307	313	327
ЗВ	ацетон	толуол	ксилол	фенол	бутанол	пропанол	этил-ацетат	бутил-ацетат	стирол	бутил-акрилат
Коэффициент аффинности, β	0,88	1,25	1,38	1,20	0,95	0,84	1,13	1,50	1,19	1,48
Концентрация ЗВ, г/м ³	3,01	2,35	1,50	0,56	0,98	1,30	2,00	1,00	0,60	0,80

7. Рассчитать коэффициент массопередачи ЗВ при адсорбции (температура адсорбции $T = 299\text{K}$, удельная поверхность $S_{уд} = 1200\text{ м}^2/\text{м}^3$).

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Скорость потока газа, ω , м/с	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,23	0,19	0,28	0,32	0,30
Плотность потока газа, ρ_g , кг/м ³	1,29	1,31	1,35	1,41	1,50	1,74	1,23	1,85	1,44	1,26
Вязкость потока газа, μ_g , Па·с·10 ³	0,019	0,021	0,022	0,025	0,028	0,031	0,017	0,038	0,026	0,018
ЗВ	ацетон	толуол	ксилол	фенол	бутанол	пропанол	этил-ацетат	бутил-ацетат	стирол	бутил-акрилат
Насыпная плотность адсорбента, ρ_s , кг/м ³	480	500	600	550	575	450	640	700	750	580
Плотность частиц адсорбента, ρ_c , кг/м ³	192	300	240	220	345	225	320	420	300	290
Эквивалентный диаметр гранул, d_g , м·10 ³	2,0	4,0	3,0	1,5	5,0	3,5	4,5	6,0	2,0	4,0
Радиус пор, r_p , м·10 ¹⁰	3	5	9	2	8	6	10	4	7	3

8. Рассчитать объем каталитического реактора ($V_{кр}$), время пребывания газа в слое катализатора (τ), температуру газа на выходе из каталитического реактора (t_k)

Примечание: принять ω – скорость газа в реакторе - равной 1,5 м/с; ε – порозность слоя катализатора - равной 0,5; давление P – 10^5 Па, температура газа – $T=298$ К, средняя теплоемкость газа – 0,029 кДж/моль·град

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Расход газового потока, Q_r , тыс. м ³ /ч	30	40	25	60	45	70	35	50	75	10
ЗВ	толуол	ацетон	ксилол	фенол	бутанол	пропанол	этилацетат	бутилацетат	стирол	бути-лакрилат
Температура зажигания, t_z , °С,	360	300	290	350	400	390	425	385	410	370
Объемная скорость, K^* , тыс. ч ⁻¹	10	15,5	14	9	12	15	8	20	16	11
Концентрация ЗВ, c , г/м ³	3,5	3,0	2,5	1,0	0,6	1,30	2,70	1,00	1,60	0,80
Количество тепла, выделившееся в результате реакции, Q_p , кДж/моль	2940	3100	3000	3200	3100	2820	2800	2850	3200	3600

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

1. Пример расчета.

Исходные данные:

Размер частиц - $d_{\text{ч}} = 30$ мкм;

плотность частиц - $\rho_{\text{ч}} = 2500$ кг/м³;

вязкость воздуха - $\mu = 25 \cdot 10^{-6}$ Па·с.

Определить скорость осаждения частиц под действием силы тяжести.

Решение:

1. По формуле (1)

$$W_{\text{ч}} = \frac{d_{\text{ч}}^2 \cdot \rho_{\text{ч}} \cdot g}{18 \cdot \mu}$$

определяем скорость осаждения частицы $W_{\text{ч}}$:

$$W_{\text{ч}} = \frac{(30 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 2500 \cdot 9,8}{18 \cdot 25 \cdot 10^{-6}} = 0,049 \text{ м/с.}$$

2. Проверим величину критерия Рейнольдса Re :

$$Re = \frac{W_{\text{ч}} \cdot d_{\text{ч}} \cdot \rho_{\text{г}}}{\mu} = \frac{0,049 \cdot 30 \cdot 10^{-6} \cdot 1,2}{25 \cdot 10^{-6}} = 0,07 ;$$

$Re < 3,0$, следовательно формула (1) применена верно. При $Re > 3$ следует использовать формулу (2):

$$W_{\text{ч}} = \frac{\sqrt{4 \cdot d_{\text{ч}} \cdot \rho_{\text{ч}} \cdot g}}{3 \cdot \mu \cdot \psi \cdot \rho_{\text{г}}},$$

$$\text{где } \psi = \frac{24}{Re} + \frac{4}{\sqrt[3]{Re}}$$

2. Пример расчета.

Исходные данные:

Медианный размер частиц - $d_{\text{m}} = 30$ мкм;

среднее квадратичное отклонение частиц - $\sigma_{\text{ч}} = 3,0$;

размер частиц с $\eta = 50\%$ $d_{50} = 4,0$ мкм;

среднее квадратичное отклонение функции распределения - $\lg \sigma_{\eta} = 0,300$.

Определить эффективность улавливания частиц.

Решение:

1. Определяем величину X по формуле:

$$X = \frac{\lg(d_m / d_{50})}{\sqrt{\lg^2 \sigma_\eta + \lg^2 \sigma_\eta}} = \frac{\lg(50/4)}{\sqrt{\lg^2 3 + 0,3^2}} = \frac{1,097}{0,564} = 1,945$$

2. По таблице находим величину $\Phi(x)$:

$$\Phi(x) = 0,9738$$

3. Эффективность улавливания частиц η равна:
 $0,9738 \cdot 100\% = 97,38 \%$

3. Пример расчета.

Исходные данные:

Расстояние между электродами – $h = 0,1$ м;

размер частиц - $d_\eta = 3,0$ мкм;

длина поля - $L=3,0$ м.

Определить степень очистки газов в электрофилт্রে.

Решение:

1. Определяем скорость дрейфа частицы W_η :

$$W_\eta = 0,5 \cdot 10^{-11} \frac{E^2 \cdot d_\eta}{\mu_\eta} = 0,5 \cdot 10^{-11} \frac{\left(\frac{50000}{0,1}\right)^2 \cdot 3 \cdot 10^{-6}}{22,2 \cdot 10^{-6}} = 0,17 \text{ м/с.}$$

2. Определяем степень очистки газов η :

$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{W_\eta \cdot L}{h \cdot W_r}\right) = 1 - \exp\left(-\frac{0,17 \cdot 3}{0,1 \cdot 1}\right) = 1 - 0,06 = 0,994 = 99,4\%.$$

4. Пример расчета.

Исходные данные:

Размер частиц - $d_\eta = 55$ мкм;

плотность частиц - $\rho_\eta = 2000$ кг/м³;

вязкость воздуха - $\mu = 20 \cdot 10^{-6}$ Па·с.

Определить скорость осаждения частиц под действием силы тяжести и размеры пылеосадительной камеры.

Решение:

1. По формуле (1)

$$W_{\text{ч}} = \frac{d_{\text{ч}}^2 \cdot \rho_{\text{ч}} \cdot g}{18 \cdot \mu};$$

определяем скорость осаждения частицы $W_{\text{ч}}$:

$$W_{\text{ч}} = \frac{(55 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 2000 \cdot 9,8}{18 \cdot 20 \cdot 16^{-6}} = 0,165 \text{ м/с}$$

2. Проверим величину критерия Рейнольдса Re :

$$Re = \frac{W_{\text{ч}} \cdot d_{\text{ч}} \cdot \rho_{\text{г}}}{\mu} = \frac{0,165 \cdot 55 \cdot 10^{-6} \cdot 1,2}{20 \cdot 10^{-6}} = 0,545;$$

$Re < 3,0$, следовательно, формула (1) применена верно. При $Re > 3$ следует использовать формулу (2):

$$W_{\text{ч}} = \frac{\sqrt{4 \cdot d_{\text{ч}} \cdot \rho_{\text{ч}} \cdot g}}{3 \cdot \mu \cdot \psi \cdot \rho_{\text{г}}},$$

где $\psi = \frac{24}{Re} + \frac{4}{\sqrt[3]{Re}}$

3. Используя формулу (1.13) и условие $L/H = 3$, находим скорость осаждения частицы:

$$\begin{cases} \frac{H}{W_{\text{ч}}} = \frac{L}{W_{\text{г}}} \\ L/H = 3 \end{cases} \Rightarrow W_{\text{г}} = \frac{W_{\text{ч}} \cdot L}{H} = 3 \cdot W_{\text{ч}}$$

$$\Rightarrow W_{\text{г}} = 3 \cdot 0,165 = 0,495 \text{ м/с.}$$

4. Используя ту же формулу (1.13), находим значение длины камеры (L). Примем высоту камеры равной 1 м:

$$L = \sqrt{\frac{H^2 \cdot 3 \cdot W_{\text{г}}}{W_{\text{ч}}}} = \sqrt{\frac{3 \cdot W_{\text{г}}}{W_{\text{ч}}}} = \sqrt{\frac{3 \cdot 0,495}{0,165}} = 3 \text{ м.}$$

5. Пример расчета

Исходные данные:

объёмный расход газового потока, G	– 30000 м ³ /ч;
объём абсорбера, V	– 17,5 м ³ ;
загрязняющее вещество (ЗВ)	– NH ₃ ;
константа фазового равновесия, m _c · 10 ³	– 0,0006;
концентрация ЗВ, с	– 0,001 кг/м ³ ;
время обновления поверхности, Θ · 10 ³	– 0,5 с;
эффективность очистки, η	– 90%.

Решение:

Объем активной части абсорбера, необходимый для обеспечения заданной эффективности, можно рассчитать по формуле:

$$V = \frac{G \cdot N_{or}}{3600 \cdot K_y}, \quad (5.1)$$

где N_{ог} - число единиц переноса ; K_y - коэффициент массопередачи, с⁻¹.

Число единиц переноса найдём по формуле:

$$N_{or} = \frac{y_0 - y_k}{\Delta_{cp}}, \quad (5.2)$$

где y₀, y_k – концентрации ЗВ в газовой фазе на входе и выходе из абсорбера в мольных долях,

Δ_{ср} – средняя движущая сила абсорбции, рассчитанная по формуле:

$$\Delta_{cp} = (\Delta_1 - \Delta_2) / \ln(\Delta_1 / \Delta_2), \quad (5.3)$$

где Δ₁ = y₀ – m_{yx} · x₀, Δ₂ = y_k – m_{yx} · x_k

(x₀, x_k – концентрация ЗВ в отработанном и свежем абсорбенте).

Для пересчета концентрации ЗВ в газовой фазе из кг/м³ в мольные доли пользуются следующей формулой:

$$y = \frac{c \cdot R \cdot T}{M_k \cdot P}, \quad (5.4)$$

где R – универсальная газовая постоянная, 8314,4 Па·м³/кмоль·К;

M_k – молекулярная масса вещества, кг/кмоль.

Таким образом, для данного примера

$$y_0 = 1 \cdot 10^{-3} \cdot 8314.4 \cdot 298 / (17 \cdot 10^5) = 1.46 \cdot 10^{-3},$$

$$y_k = 0.1 \cdot 10^{-3} \cdot 8314.4 \cdot 298 / (17 \cdot 10^5) = 1.46 \cdot 10^{-4}$$

Для пересчета концентрации ЗВ в жидкой фазе из кг/м³ в мольные доли пользуются следующей формулой:

$$x = \frac{c_{\text{ж}} \cdot M_{\text{ж}}}{M_{\text{к}} \cdot \rho_{\text{ж}}}, \quad (5.5)$$

где $c_{\text{ж}}$ - концентрация ЗВ в жидкой фазе (абсорбенте), кг/м³;

$M_{\text{ж}}$ - молекулярная масса жидкости, кг/кмоль; $\rho_{\text{ж}}$ - плотность жидкости, кг/м³.

Концентрация ЗВ в свежем абсорбенте равна нулю, т.е. $x_{\text{к}} = 0$.

Рассчитаем концентрацию ЗВ в отработанном абсорбенте:

$$x_0 = 0.1 \cdot 18 / (17 \cdot 1000) = 1.06 \cdot 10^{-4}$$

При физической абсорбции равновесие между концентрациями ЗВ в газовой и жидкой фазах характеризуется константой фазового распределения (равновесия) - m .

В зависимости от способа выражения концентраций m может быть выражена в разных единицах.

В данной задаче необходимо пересчитать константу m_{yx} ($m_{\text{yx}} = y_{\text{г}}/x_{\text{ж}}$) в единицы константы $m_{\text{с}}$ ($m_{\text{с}} = c_{\text{г}}/c_{\text{ж}}$, где $c_{\text{г}}$ и $c_{\text{ж}}$ - концентрации ЗВ в газовой и жидкой фазах, кмоль/м³). Пересчет $m_{\text{yx}} \rightarrow m_{\text{с}}$ можно осуществить следующим образом:

$$m_{\text{yx}} = \frac{y}{x} = \frac{c_{\text{г}} \cdot R \cdot T \cdot \rho_{\text{ж}}}{P \cdot c_{\text{ж}} \cdot M_{\text{ж}}} = m_{\text{с}} \cdot \frac{R \cdot T \cdot \rho_{\text{ж}}}{P \cdot M_{\text{ж}}}$$

$$m_{\text{yx}} = 0.0006 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{8314.4 \cdot 298 \cdot 1000}{10^5 \cdot 18} = 8.25 \cdot 10^{-3}.$$

Определим движущие силы абсорбции на входе и выходе аппарата:

$$\Delta_1 = 1,46 \cdot 10^{-3} - 8,25 \cdot 10^{-3} \cdot 1,06 \cdot 10^{-4} = 1,46 \cdot 10^{-3}$$

$$\Delta_2 = 1,46 \cdot 10^{-4} - 8,25 \cdot 10^{-3} \cdot 0 = 1,46 \cdot 10^{-4}$$

Средняя движущая сила абсорбции:

$$\Delta_{\text{ср}} = (1,46 \cdot 10^{-3} - 1,46 \cdot 10^{-4}) / \ln(1,46 \cdot 10^{-3} / 1,46 \cdot 10^{-4}) = 5,71 \cdot 10^{-4}$$

Число единиц переноса: $N_{\text{ог}} = (1,46 \cdot 10^{-3} - 1,46 \cdot 10^{-4}) / 5,71 \cdot 10^{-4} = 2.3$

Основным уравнением массопередачи является уравнение аддитивности фазовых сопротивлений:

$$\frac{1}{K_y} = \frac{1}{\beta_y} + \frac{m_{\text{с}}}{\beta_x}, \quad (5.6)$$

где K_y - коэффициент массопередачи, с⁻¹;

β_y, β_x - коэффициенты массоотдачи в газовой и жидкой фазах, м/с.

Величину K_y найдем из выражения (5.1) и переведем через f в м/с :

$$K_y = \frac{30000 \cdot 2.3}{3600 \cdot 17.5} = 1.1 \text{ с}^{-1} = 1,1 \text{ с}^{-1} / 110 \text{ м}^{-1} = 0,01 \text{ м/с}.$$

Согласно модели обновления поверхности, коэффициент массоотдачи в жидкой фазе определяется по формуле:

$$\beta_x = 1,128 \cdot \sqrt{D_{\text{ж}} / \Theta}, \quad (5.7)$$

где $D_{\text{ж}}$ - в жидкой фазе, м²/с.

Значения коэффициента диффузии ЗВ в воде прием по таблице.

Коэффициенты диффузии веществ в воде (T=293 K). Таблица 5.1.

Вещество	H ₂ S	SO ₂	NO ₂	NH ₃	HCl	HF	Cl ₂
D _ж ²⁰ · 10 ⁹ , м ² /с	1,41	1,47	1,54	1,76	2,64	2,70	1,22

Для пересчета значения D_ж в соответствии с условиями задачи воспользуемся формулой:

$$D_{ж} = D_{ж}^{20} \left[1 + \frac{0.2 \sqrt{\mu_{ж}^{20}}}{\sqrt[3]{\rho_{ж}}} (t - 20) \right], \quad (5.8)$$

где $\mu_{ж}^{20}$ - динамическая вязкость жидкости, МПа·с (для воды – 1.1 МПа·с)

$$D_{ж} = 1.76 \cdot 10^{-9} \left[1 + \frac{0.2 \sqrt{1.1}}{\sqrt[3]{1000}} (25 - 20) \right] = 1.95 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с},$$

тогда $\beta_x = 1,128 \cdot \sqrt{1.95 \cdot 10^{-9} / 0.5 \cdot 10^{-3}} = 2,23 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}.$

Из уравнения (7) найдём β_y : $\frac{1}{\beta_y} = \frac{1}{K_y} - \frac{m_c}{\beta_x} = \frac{1}{0.01} - \frac{0.0006 \cdot 10^{-3}}{2.23 \cdot 10^{-4}} = 100$

$\beta_y = 0,01 \text{ м/с}$

6. Пример расчета.

Исходные данные:

Температура адсорбции T₂ - 303 K

ЗВ – ацетон, концентрация ЗВ – 3,01 г/м³; коэффициент аффинности, β – 0,88.

Если известна изотерма адсорбции стандартного вещества на данном адсорбенте, то, используя её, можно рассчитать и построить изотерму любого другого вещества на этом адсорбенте при любой температуре. В данном случае в качестве стандартного вещества взят бензол. Величину адсорбции бензола (a_б, г/Г_{адсорбента}) можно найти из уравнений:

$$a_b = 1,04 \cdot c_b^{0,802}, \text{ если } c_b \leq 2 \text{ г/м}^3 \quad (6.1)$$

$$a_b = 0,24, \text{ если } c_b > 2 \text{ г/м}^3 \quad (6.2)$$

Для решения этих уравнений необходимо рассчитать концентрацию стандартного вещества c_б, соответствующую начальной концентрации ЗВ - c_{ЗВ} из уравнения изотермы Поляни:

$$\lg c_{ЗВ} = \lg c_{ЗВ}^H - \beta \cdot \frac{T_1}{T_2} \lg \frac{c_b^H}{c_b}, \quad (6.3)$$

где c_б^H - концентрация стандартного вещества в состоянии насыщения при T₁ = 298 K, г/м³;

$c_{ЗВ}^H$ - концентрация ЗВ в состоянии насыщения при температуре адсорбции, г/м³

Концентрацию вещества в состоянии насыщения найдём из уравнения:

$$c^H = \frac{16 \cdot M_k \cdot P_H}{T}, \quad (6.4)$$

где P_H - давление насыщенного пара вещества, мм рт.ст.

Величину P_H можно найти в справочной литературе или рассчитать по формуле:

$$\lg P_H = 2.763 - 0.019 \cdot t_{\text{кип}} + 0,024 \cdot t_{\text{адс}}, \quad (6.5)$$

где $t_{\text{кип}}$, $t_{\text{адс}}$ – температуры кипения вещества и температура адсорбции, °С.

Справочные данные для расчета. Таблица 6.1.

Вещество	Формула	M_k , кг/кмоль	ρ , г/мл	$t_{\text{кип}}$, °С	$D_r^0 \cdot 10^4$, м ² /с
Ацетон	C_3H_6O	58	0,791	56,5	0,0820
Толуол	$C_6H_5CH_3$	92	0,867	111,0	0,0710
Ксилол	$C_6H_4(CH_3)_2$	106	0,862	139,0	0,0620
Фенол	C_6H_5OH	94	1,070	182,0	0,0618
Бутанол	C_4H_9OH	74	0,812	117,0	0,0703
Пропанол	C_3H_7OH	60	0,803	98,0	0,0850
Этилацетат	$CH_3COOC_2H_5$	88	0,900	77,0	0,0710
Бутилацетат	$CH_3COOC_4H_9$	116	0,881	126,0	0,0574
Стирол	C_8H_8	104	0,906	145,0	0,0674
Бутилакрилат	$C_7H_{12}O_2$	128	0,879	123,0	0,0520
Бензол	C_6H_6	78	0,879	80,0	0,0770

Величина адсорбции ЗВ, равновесная концентрации $c_{ЗВ}$, определяется по формуле:

$$a_{ЗВ} = a_0 \cdot \beta \quad (6.6)$$

Рассчитаем величину адсорбции ЗВ, используя приведенные выше формулы и справочные данные.

Давление насыщенного пара ацетона

$$\lg P_H^{ЗВ} = 2.763 - 0.019 \cdot 56,5 + 0,024 \cdot 30 = 2,4089; P_H^{ЗВ} = 256 \text{ мм рт.ст.}$$

Давление насыщенного пара бензола

$$\lg P_H^б = 2.763 - 0.019 \cdot 79,0 + 0,024 \cdot 25 = 1,8630; P_H^б = 73 \text{ мм рт.ст.}$$

Концентрация ацетона в состоянии насыщения:

$$c_{\text{ац}}^H = \frac{16 \cdot 58 \cdot 256}{303} = 784 \text{ г/м}^3$$

Концентрация бензола в состоянии насыщения:

$$c_{\text{б}}^{\text{н}} = \frac{16 \cdot 78 \cdot 73}{298} = 306 \text{ г/м}^3$$

Из уравнения Поляни находим

$$\lg 3.01 = \lg 784 - 0.88 \cdot \frac{298}{303} \lg \frac{306}{c_{\text{б}}}, \quad 0.479 = 2.894 - 0.865 \lg \frac{306}{c_{\text{б}}},$$

$$2.415 = 0.865 \cdot \lg \frac{306}{c_{\text{б}}}, \quad \lg \frac{306}{c_{\text{б}}} = 2.792, \quad c_{\text{б}} = 2 \text{ г/м}^3$$

Величина адсорбции бензола $a_{\text{б}} = 1,04 \cdot 2^{0,802} = 1,81 \text{ г/Г}_{\text{адсорбента}}$

Величина адсорбции ацетона $a_{\text{ац}} = 1,81 \cdot 0,88 = 1,59 \text{ г/Г}_{\text{адсорбента}}$

7. Пример расчета.

Исходные данные:

Скорость потока газа, ω , м/с	0,15
Плотность потока газа, $\rho_{\text{г}}$, кг/м ³	1,29
Вязкость потока газа, $\mu_{\text{г}}$, Па·с·10 ³	0,019
Загрязняющее вещество	ацетон
Насыпная плотность адсорбента, $\rho_{\text{т}}$, кг/м ³	480
Плотность частиц адсорбента, $\rho_{\text{ч}}$, кг/м ³	192
Эквивалентный диаметр гранул, $d_{\text{э}}$, м·10 ³	2,0
Радиус пор, $r_{\text{п}}$, м·10 ¹⁰	3

Решение:

Для адсорбции также справедливо уравнение аддитивности фазовых сопротивлений:

$$\frac{1}{K_y} = \frac{1}{\beta_y} + \frac{1}{\beta_{\text{т}} + \beta_{\text{п}}} + \frac{D_{\text{пр}}}{\omega^2}, \quad (7.1)$$

где K_y – коэффициент массопередачи, с⁻¹;

$\beta_y, \beta_{\text{т}}, \beta_{\text{п}}$ – коэффициенты массоотдачи в газовой, твердой фазах и порах,

1/с.

$D_{\text{пр}}$ – коэффициент продольной диффузии, м²/с;

ω – скорость потока газа, м/с

По условию задачи примем $1/\beta_T = 0; D_{пр}/\omega^2 = 0$, следовательно, уравнение (7.1) принимает вид:

$$\frac{1}{K_y} = \frac{1}{\beta_y} + \frac{1}{\beta_n},$$

Коэффициент массоотдачи в газовой фазе найдём из уравнений:

$$\beta_y = 0.725 \cdot Re_3^{0.47} \cdot Pr^{0.33} \cdot D_r / d_3^2, \quad (\text{при } Re_3 \leq 30) \quad (7.2)$$

$$\beta_y = 0.395 \cdot Re_3^{0.64} \cdot Pr^{0.33} \cdot D_r / d_3^2, \quad (\text{при } Re_3 > 30) \quad (7.3)$$

Величину критериев Re_3 и Pr найдём по формулам:

$$Re_3 = \frac{\omega \cdot d_3 \cdot \rho_r}{\mu_r} \quad (7.4):$$

$$Re_3 = \frac{0.15 \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot 1.29}{0.19 \cdot 10^{-4}} = 20,4$$

$$Pr = \frac{\mu_r}{\rho_r \cdot D_r}, \quad (7.5)$$

где D_r - коэффициент диффузии вещества в воздухе (значения при $T = 273K$ взять из табл.5.1).

Для пересчета D_r^0 на температуру адсорбции использовать уравнение:

$$D_r^t = D_r^0 (T/273)^{1.5} \quad (7.6)$$

$$\text{Для условий примера (ацетон)} \quad D_r^0 = 0,082 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с},$$

$$D_r^t = 0,082 \cdot 10^{-4} (299/273)^{1.5} = 0,094 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}.$$

$$Pr = \frac{\mu_r}{\rho_r \cdot D_r} = 1,57 ;$$

$$\beta_y = 0.725 \cdot 20,4^{0.47} \cdot 1,57^{0.33} \cdot 0,094 \cdot 10^{-4} / (2 \cdot 10^{-3})^2 = 8,34 \text{ 1/с}.$$

Коэффициент массоотдачи в порах рассчитаем по формуле:

$$\beta_n = \frac{10 \cdot D_n}{d_3}, \quad (7.7)$$

где D_n - коэффициент диффузии вещества в порах, $\text{м}^2/\text{с}$, найдём по формуле:

$$D_n = \frac{\varepsilon_q \cdot D_r}{2} \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{4 \cdot r_n}{3 \cdot D_r} \sqrt{8 \cdot R \cdot T / M_k}\right) \right], \quad (7.8)$$

где ε_q - пористость частиц адсорбента, $\varepsilon_q = 1 - \frac{\rho_{ч}}{\rho_T}$

$$\varepsilon_q = 1 - \frac{192}{480} = 0,6, \text{ тогда}$$

$$D_{II} = \frac{0,6 \cdot 0,094 \cdot 10^{-4}}{2} \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{4 \cdot 3 \cdot 10^{-10}}{3 \cdot 0,094 \cdot 10^{-4}} \sqrt{8 \cdot 8314,4 \cdot 299/58}\right) \right] = 5,6 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}.$$

$$\beta_{II} = \frac{10 \cdot 5,6 \cdot 10^{-8}}{2 \cdot 10^{-3}} = 2,8 \cdot 10^{-4} \text{ м/с},$$

Величину β_{II} переведем через удельную поверхность в 1/с: $2,8 \cdot 10^{-4} \cdot 1200 = 0,3361/\text{с}$

$$\frac{1}{K_y} = \frac{1}{8,34} + \frac{1}{0,336} = 3,1$$

$$K_y = 0,3231/\text{с}.$$

8. Пример решения.

Исходные данные:

Расход газового потока, $Q_{г}$, тыс. м ³ /ч	30
Загрязняющее вещество	толуол
Температура зажигания, t_3 , °С,	360
Объемная скорость, K^* , тыс. ч ⁻¹	10
Концентрация ЗВ, c , г/м ³	3,5
Количество тепла, выделившееся в результате реакции, Q_p , кДж/моль	2940

Решение:

Объем активной части каталитического реактора ($V_{кр}$, м³) можно рассчитать по формуле:

$$V_{кр} = \frac{Q_{г}}{K^*} = \frac{30000}{10000} = 3 \text{ м}^3 \quad (8.1)$$

Продолжительность пребывания газа в слое катализатора (τ) найдём из формулы:

$$\tau = \frac{H}{\omega \cdot \varepsilon}, \quad (8.2)$$

где H – высота слоя катализатора, м; ω – скорость газа в реакторе, м/с; ε – порозность слоя катализатора.

Для того чтобы найти H , рассчитаем площадь поперечного сечения реактора – F (m^2)

$$F = \frac{Q_r}{3600 \cdot \omega} = \frac{30000}{3600 \cdot 1.5} = 5,6 \text{ м}^2,$$

тогда $H = V_{кр}/F = 3/5,6 = 0,54 \text{ м}$.

$$\tau = \frac{0.54}{1.5 \cdot 0.5} \approx 1 \text{ с}$$

Для расчета конечной температуры газа на выходе из каталитического реактора воспользуемся формулой :

$$t_k = t_3 + \frac{Q_p \cdot y_r}{c}, \tag{8.3}$$

где Q_p – количество тепла, выделившееся в результате реакции, кДж/моль;

y_r – концентрация ЗВ в мольных долях;

c - средняя теплоемкость газа, кДж/моль·град.

Для перевода концентрации ЗВ в мольную долю используем формулу (5.4) и данные табл. 6.1:

$$y_r = \frac{c \cdot R \cdot T}{M_k \cdot P} = \frac{3.5 \cdot 8.31 \cdot 298}{92 \cdot 10^5} = 0,00094;$$

$R = 8.31 \text{ Па} \cdot \text{м}^3/\text{моль} \cdot \text{К}$.

Тогда $t_k = 360 + \frac{2940 \cdot 0,00094}{0,029} = 454,8 \text{ }^\circ\text{C}$.

Библиографический список:

1. Теоретические основы охраны окружающей среды (Охрана атмосферного воздуха)/ Л.М. Исянов, Л.Н. Григорьев, А.В.Левин, Т.И.Буренина.-Л.: ЛТИЦБП, 1991. – 42 с.

Оглавление

Контрольные вопросы.....	3
Варианты задач.....	4
Примеры решения задач	8
Библиографический список	19

Татьяна Ивановна Буренина
Лев Николаевич Григорьев
Ольга Александровна Шанова
Ирина Альбертовна Крашенинникова

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОЧИСТКИ И ОБЕЗВРЕЖИВАНИЯ ВЫБРОСОВ

Методическое пособие
для выполнения контрольных работ

Редактор и корректор В.А. Басова

Техн. редактор Л.Я. Титова

Темплан 2011, поз.91

Подп. к печати 13.10.11. Формат 60 X 84/16. Бумага тип. № 1.
Печать офсетная. Объем 1,25 п.л.; 1,25 уч.-изд. л. Тираж 100 экз.
Изд. № 91. Цена «С». Заказ №

Ризограф Санкт-Петербургского государственного технологического университета растительных полимеров, 198095, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, 4.