Энгельсский технологический институт (филиал) федерального государственного
бюджетного образовательного учреждения
высшего образования
«Саратовский государственный технический университет
имени Гагарина Ю.А.»

Кафедра «Естественные и математические науки»

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ В АТМОСФЕРУ

Методические указания к практическим занятиям
и выполнению контрольной работы
для студентов направлений

09.03.01 «Информатика и вычислительная техника»
09.03.04 «Программная инженерия»
15.03.02 «Технологические машины и оборудование»
15.03.05 «Конструкторско-технологическоеобеспечение машиностроительных производств»
18.03.01 «Химическая технология»
20.03.01 «Техносферная безопасность»
23.03.01 «Нефтегазовое дело»
29.03.05 «Конструирование изделий легкой промышленности»

очной и заочной форм обучения

Энгельс 2026

Цель работы: ознакомиться со способами количественного определения выбросов промышленных предприятий в атмосферу и со способами очистки отходящих газов от пылей и вредных веществ.

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

1.Вредные выбросы промышленных предприятий

Все источники загрязнения атмосферного воздуха можно условно разделить на две основные группы:

- *организованные источники* основного выброса производственных газов и вентиляционного воздуха, поступающих в атмосферу через дымовые трубы, шахты вентиляционных систем и др.;
- *неорганизованные источники* выброса газов, твердых и жидких частиц (аэрозолей), поступающих в атмосферу через неплотности в аппаратуре и коммуникациях, от внутризаводских транспортных средств, от складов сырья, полуфабрикатов, золоотвалов, отвалов шлака, из воздушников емкостного оборудования и т.д.

Количество выбросов от неорганизованных источников наиболее трудно учесть при проектировании химических предприятий. По условиям выброса большинство источников из этой группы относятся к низким, наземным источникам, поэтому распространение в атмосфере поступающих таким путем вредных веществ носит ограниченный (локальный) характер.

На предприятиях, где широко применяют открытые установки (оборудование, смонтированное под открытым небом), источниками загрязнения являются вредные вещества, поступающие в окружающую среду через фланцевые соединения и неплотности оборудования, находящегося под давлением или небольшим разрежением.

Количество вредных веществ, выделяющихся из ***оборудования, работающего под давлением***, рассчитывают по формуле:

$$G = \frac{(G_н - G_к)}{\tau} = \frac{1}{\tau}\left(\frac{P_н V}{RT_н} - \frac{P_к V}{RT_к}\right), \qquad (1)$$

где G – количество газа, вытекающего из оборудования, кг/ч; $G_н$ и $G_к$ – начальное и конечное содержание газа в оборудовании, кг; τ – время, в течение которого измеряется давление от начального $P_н$ до конечного $P_к$; V – объем газовой или паровоздушной фазы в оборудовании; $T_н$ и $T_к$ – начальная и конечная температура, К; R – газовая постоянная для рабочей среды, Дж/(кг·К), $R=8314/M_{газа}$., если $T_н=T_к=T$, то формула (1) примет вид:

$$G=\Delta PV/\tau RT. \qquad (2)$$

Для определения значения G проводят испытания оборудования и трубопроводов на герметичность. При испытаниях на герметичность оборудования и трубопроводов, работающих под давлением, измеряют

рабочее давление или давление начала испытания $P_н$ и падение давления за определенный промежуток времени τ. Для этого к испытуемому оборудованию подсоединяют прибор, изображенный на рис. 1.

Рабочее давление измеряют манометром 2, а падение давления – жидкостным дифференциальным манометром 4. Порядок проведения измерений следующий. Подают исследуемый газ из баллона 5 до рабочего (начального) давления $P_н$, и трехходовой кран 3 ставят в положение, указанное на рис. 1, б. При утечке исследуемого газа через неплотности давление в оборудовании уменьшается. Падение давления на величину ΔP за время τ регистрируют по дифманометру.

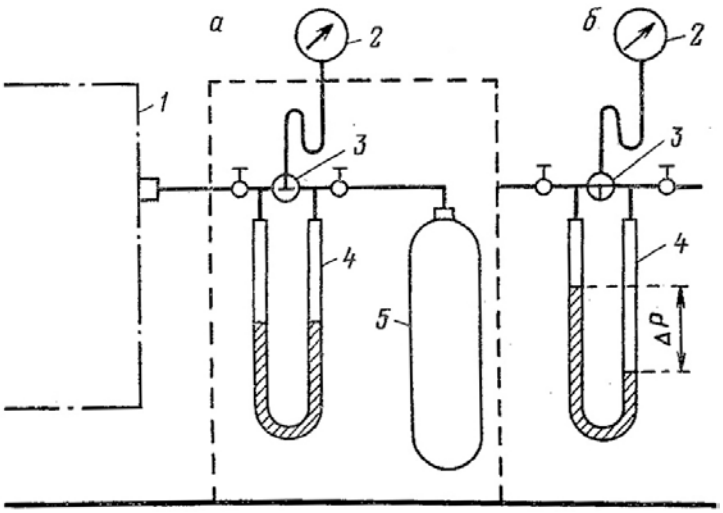

Рис. 1. Прибор для измерения падения давления при испытании оборудования на герметичность: а – прибор для испытаний; б – положение трехходового уравнительного крана и жидкости в дифманометре во время испытания; 1 – испытуемое оборудование; 2 – манометр; 3 – трехходовой уравнительный кран; 4 – дифференциальный манометр; 5 – контрольная емкость

По результатам испытания рассчитывают количество газа, вытекающего из оборудования, и делают заключение о герметичности последнего. Герметичность химического оборудования контролируют по количеству вытекающего из оборудования газа G; уровень допустимых выбросов из работающего оборудования лимитируется нормативом, превышение величины которого недопустимо.

Численные оценки качества оборудования, монтажа, уплотнений проводят с использованием показателя, называемого *коэффициентом негерметичности.*

Коэффициент негерметичности *m* есть величина относительного падения давления при испытании оборудования в единицу времени:

$$m = \frac{1}{\tau}\left(1 - \frac{P_к T_н}{P_н T_к}\right). \qquad (3)$$

Преобразуя формулы (1) и (3), получим:

$$m = G\frac{RT_н}{P_н V}. \qquad (4)$$

Формула (4) позволяет рассчитать по данным испытания оборудования на герметичность значение коэффициента негерметичности.

В качестве исследуемого газа при испытании на герметичность можно использовать рабочий газ или воздух. Если испытания проводят воздухом при Т=293 К, то расчет ведут по формуле:

$$m = 8{,}3 \cdot 10^3 G \frac{1}{\eta P_н V} \sqrt{\frac{T_р}{M_р}}, \qquad (5)$$

где $8{,}3 \cdot 10^3$ – коэффициент, учитывающий время испытания (1 ч, Т=293 К) и газовую постоянную воздуха $R_в$=286,5 Дж/(кг·К); η – коэффициент запаса, учитывающий ухудшение состояния герметизации между капитальными ремонтами оборудования (выбирают в интервале 1,5-2,0); $T_р$ – рабочая температура, К; $M_р$ – молекулярная масса рабочего газа.

Таблица 1

Коэффициент негерметичности *m* для оборудования и газопроводов

Оборудование	Среда в оборудовании	Продолжительность испытаний при начальном рабочем давлении, ч	Коэффициент негерметичности, *m*, $ч^{-1}$
Сосуды, поршневые компрессоры и другое технологическое оборудование, работающее под давлением:	Токсичная и пожаро-взрывоопасная		
- вновь установленное		24	$1{,}0 \cdot 10^{-2}$
- подвергающееся повторному испытанию		4	$0{,}5 \cdot 10^{-2}$
Трубопроводы для горючих, токсичных и сжиженных газов:			
- внутрицеховые	Токсичная и горючая	24	$0{,}05 \cdot 10^{-2}$
	Прочие горючие газы	24	$0{,}1 \cdot 10^{-2}$
- межцеховые	Токсичная и горючая	24	$0{,}1 \cdot 10^{-2}$
	Прочие горючие газы	24	$0{,}2 \cdot 10^{-2}$
Корпуса электрофильтров для очистки взрывоопасных или токсичных газов	Токсичная или взрывоопасная	1*	0,03

* При давлении 5-200 кПа.

Если газовое пространство в оборудовании заполнено смесью газов, то в формулу (5) подставляют среднее значение относительной молекулярной массы:

$$M_{ср}=M_1 i_1+M_2 i_2+\ldots+M_n i_n, \qquad (6)$$

где M_1, M_2, …, M_n – относительные молекулярные массы газов и паров, входящих в смесь; i_1, i_2, …, i_n – доля по массе каждого газа или пара в смеси.

Количество каждого газа или пара, вытекающего из оборудования, равно, кг/ч:

$$G_n=i_n G\,, \qquad (7)$$

где G_n – общее количество вытекающего газа, найденное по формуле (5).

В табл. 1 приведены значения *m* для оборудования и газопроводов различных типов.

Пример 1. Рассчитать количество диоксида серы, выделяющегося за 1 ч из трубопровода, имеющего внутренний диаметр 100 мм и общую протяженность 100 м. При испытаниях на герметичность в течение 24 ч установлено, что давление диоксида серы в этом трубопроводе снизилось с $1\cdot10^5$ Па до $9{,}909\cdot10^5$ Па, $T_н=T_к=293$ К.

Решение. Находим значение газовой постоянной для диоксида серы ($M_{SO_2}=64$).

$$R_{SO_2}=\frac{8314}{M_{SO_2}}=\frac{8314}{64}=130 \text{ (Дж/(кг·К))}.$$

Рассчитаем объем трубопровода:

$$\mathrm{V}=\frac{\pi D^2}{4}l=\frac{3{,}14\cdot0{,}1^2}{4}\cdot100=0{,}7 \text{ (м}^3\text{)}.$$

По формуле (2) находим количество диоксида серы, выделяющегося из трубопровода:

$$\mathrm{G}=\frac{9{,}1\cdot10^3\cdot0{,}7}{24\cdot293\cdot130}=7\cdot10^{-3} \text{ (кг/ч)}.$$

Пример 2. По данным примера 1 рассчитать коэффициент негерметичности и сравнить с нормативным значением (табл. 1).

Решение. По формуле (4) находим:

$$m=7\cdot10^{-3}\cdot\frac{130\cdot293}{10^6\cdot0{,}7}=3{,}81\cdot10^{-4} \text{ (ч}^{-1}\text{)}.$$

В табл. 1 для рассчитываемых условий $m=0{,}05\cdot10^{-2}$ ч$^{-1}$. Следовательно, рассчитываемый трубопровод имеет требуемую герметичность.

Пример 3. По результатам испытаний рассчитать коэффициент негерметичности емкости газообразного хлора объемом 20 м^3, имеющей рабочую температуру $T_р=300$ К. Испытание емкости на герметичность проводили с использованием воздуха и установили G=2 кг/ч; $P_н=1{,}5\cdot10^5$ Па.

Решение. Выбираем η=2,0, молекулярная масса хлора $M_р=71$. По формуле (5) находим коэффициент негерметичности:

$$m=8{,}3\cdot10^3\cdot2\frac{1}{2\cdot1{,}5\cdot20}\sqrt{\frac{300}{71}}=5{,}5\cdot10^{-3} \text{ ч}^{-1}.$$

В соответствии с табл. 1 рассматриваемая емкость не имеет требуемой герметичности.

Оборудование, работающее при разрежении до 10^3 Па, также является источником загрязнения воздушной среды. При более высоком разрежении оборудование рассматривается как вакуумное и к его герметичности предъявляются повышенные требования, контролируемые

соответствующими нормативами. В связи с этим такое оборудование можно не рассматривать как источник загрязнения воздушной среды.

Несмотря на разрежение, в результате молекулярной диффузии через неплотности навстречу потоку воздуха происходит вынос вредных веществ в окружающую среду, особенно когда внутри оборудования присутствуют вредные вещества при высоких концентрациях. Количество таких веществ, проникающих через неплотности оборудования, работающего под разрежением, можно рассчитать по формуле:

$$G = \frac{C_0 f D^2}{2 m_1 \Delta P}, \qquad (8)$$

где C_0 – концентрация вредного вещества в оборудовании, г/м^3; D – коэффициент диффузии в воздух вредного вещества в производственных условиях, мг/с; f – суммарная площадь сквозных пор в корпусах оборудования, м^2; m_1 – коэффициент негерметичности, ч$^{-1}$, равный отношению расхода газа, отсасываемого из оборудования L, м^3/ч, к создаваемому в оборудовании разрежению,

$$m_1 = \frac{L}{\Delta P};$$

ΔP – величина разрежения в оборудовании, Па.

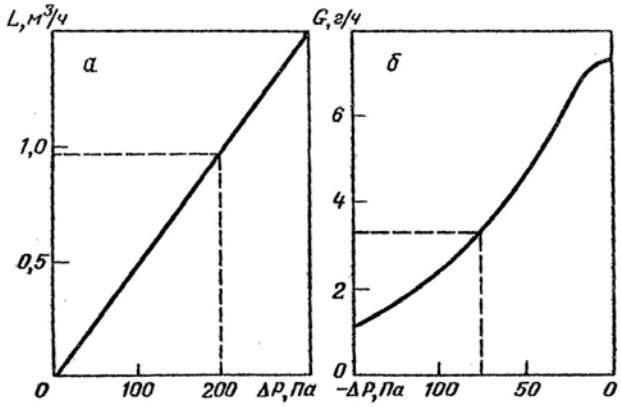

Рис. 2. Примерный паспорт ванны электролиза хлора на ртутном катоде:
а – зависимость разрежения в ванне электролиза хлора от количества удаляемого из нее воздуха; б – зависимость количества выделяющегося из ванны хлора от разрежения в ней

Зависимость L и G от разрежения в химической аппаратуре приведена в паспорте оборудования. Пример таких зависимостей, взятый из паспорта ванны для получения хлора на ртутном катоде, представлен на рис. 2. В производственных условиях определяют только коэффициент негерметичности m_1. Совпадение его значения с паспортным дает основание заключить, что количество вредных веществ, проникающих из этого оборудования, будет соответствовать паспортному.

Если в производственных условиях величина m_1 оказывается больше паспортной, то принимают меры к усилению герметизации оборудования. Если m_1 меньше паспортной, то можно существенно снизить выделение вредных веществ из оборудования.

Пример 4. По данным паспорта рассчитать коэффициент негерметичности ванны для электролиза при получении хлора.

Решение. По рис. 2, а находим для выбранного разрежения ΔP=200 Па, допустимый расход L=0,9 м^3/ч. Согласно определению коэффициента негерметичности:

$$m_1 = \frac{L}{\Delta P} = \frac{0,9}{200} = 0,0045 \ (ч^{-1}).$$

Пример 5. В результате испытаний ванны электролиза для получения хлора в производственном помещении установлено, что при создаваемом разрежении 75 Па из нее выделяется 3 г хлора в 1 ч. Дать заключение о ее герметичности.

Решение. По рис. 2, б находим допустимое количество хлора, выделяемого при разрежении 75 Па, оно составляет 3,05 г/ч. Следовательно, герметичность ванны соответствует паспортной.

Существенным источником загрязнения воздуха на химических и нефтехимических предприятиях, в том числе с расположенным на открытых площадках оборудованием, являются ***неплотности фланцевых соединений.*** Герметизация их создается прокладками из различных уплотнительных материалов (паронита, резины, асбеста, фторопласта и др.). Однако, применение прокладок не гарантирует полной герметизации уплотнений.

На рис. 3 показана зависимость истечения паров ацетонитрила через прокладки из паронита от времени. Процесс истечения во времени можно разделить на три периода: первый – возрастание утечек до максимума (примерно 30-59 сут), второй – уменьшение утечек (100-150 сут) до стабилизации, третий – стационарный процесс. Истечение происходит двумя путями: через микронеровности на границе прокладка-металл и через объем прокладки в результате диффузии.

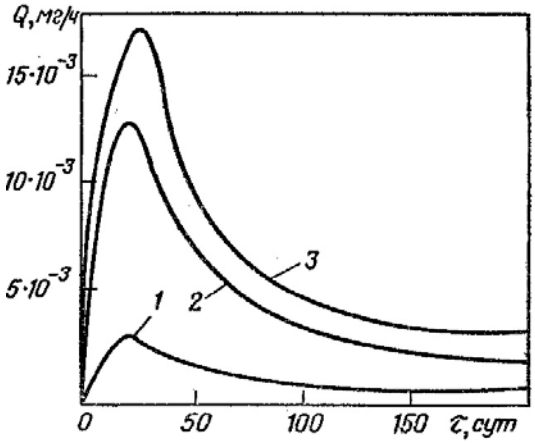

Рис. 3. Зависимость утечек ацетонитрила от продолжительности его воздействия для прокладок из паронита при различном давлении среды:
1 - 1·10^5 Па; 2 - 3·10^5 Па; 3 - 6·10^5 Па

Для уменьшения выделения газов прокладки следует заменять частично, а не на всем аппарате или другом оборудовании одновременно. Через 300-400 сут эксплуатации под воздействием агрессивных свойств

среды прокладка теряет упругость, а утечки возрастают примерно в 1,5 раза.

Количество вредного вещества G, поступающего через прокладку, рассчитывают по формуле, кг/с:

$$G \approx \frac{a\Delta P\delta}{g_{уд}\nu}, \qquad (9)$$

где ΔP – падение давления газа во фланцевом соединении, Па; $g_{уд}$ – удельное давление, оказываемое на прокладку фланцами при затягивании их болтами, Па; δ – толщина прокладки, м; ν – кинетическая вязкость среды, $м^2/с$; *a* – коэффициент пропорциональности, равный отношению проницаемости к удельному давлению и устанавливаемый экспериментально (размерность Н).

Таким образом, количество вредного вещества, поступающего в атмосферу через прокладки, возрастает с увеличением давления внутри оборудования или трубопровода, толщины прокладок и уменьшается с ростом усилия затяжки фланцевого соединения, а также при возрастании вязкости жидкости, находящейся в оборудовании или трубопроводе.

Пример 6. Рассчитать утечку ацетонитрила через прокладку из паронита толщиной $3\cdot10^{-3}$ м, затянутую до удельного напряжения $166\cdot10^5$ Па. Давление в рабочем объеме $1\cdot10^5$ Па, температура 30 °С (a=$0{,}5\cdot10^{-11}$ Н).

Решение. По справочнику находим значение кинематической вязкости ацетонитрила, равное $1{,}28\cdot10^{-5}$ $м^2/с$. По формуле (9) рассчитываем утечку ацетонитрила:

$$G = \frac{1\cdot10^5\cdot3\cdot10^{-3}\cdot0{,}5\cdot10^{-11}}{166\cdot10^5\cdot1{,}28\cdot10^{-5}} = 7\cdot10^{-12}\,(кг/с).$$

Пример 7. Сохраняя условия примера 6, оценить изменение экологической обстановки в цехе при уменьшении удельного напряжения затяжки прокладок вдвое.

Решение. Используя уравнение (9), получим:

$$G = \frac{1\cdot10^5\cdot3\cdot10^{-3}\cdot0{,}5\cdot10^{-11}}{83\cdot10^5\cdot1{,}28\cdot10^{-5}} = 14\cdot10^{-12}\,кг/с = 5\cdot10^{-3}\,кг/ч\,.$$

Концентрация ацетонитрила в помещении цеха увеличится примерно в 2 раза по сравнению с нормой.

2. Очистка выбрасываемого предприятиями в атмосферу воздуха от вредных газов и пыли

По количественному и качественному составу вредных выбросов промышленные производства можно разделить на четыре группы:

1) производства, выбрасывающие в атмосферу условно чистые технологические и вентиляционные выбросы с содержанием вредных веществ, не превышающим предельно допустимые концентрации в рабочей зоне производственных помещений;
2) производства, выбрасывающие в атмосферу неприятно пахнущие газы;
3) производства со значительными выбросами газа, содержащего нетоксичные или инертные вещества;

4) производства, выбрасывающие в атмосферу токсичные и канцерогенные вещества.

В химической и нефтехимической промышленности к производствам первой группы относятся цехи с технологическими печами, работающими на природном газе и малосернистом мазуте; ко второй – производство азотной кислоты с каталитической очисткой; к третьей – цехи с дробильно-помольным оборудованием, сушильными барабанами, обогатительные фабрики; к четвертой группе относится большинство химических и нефтехимических производств. Это, в частности, производство полиэтилена, фенола, полиамидных и фенолформальдегидных смол, фталевого ангидрида, серной и соляной кислот, стирола, эфиров, электролитической щелочи и хлора, сульфата и карбида кальция, нефтяного кокса, корда, карбамида, гербицидов, слабой азотной кислоты без каталитической очистки, аммиака, метанола, ацетилена и др. Таким образом, большинство химических производств относится к четвертой группе по составу вредных выбросов.

Техника очистки газов весьма разнообразна как по характеру конструкций аппаратов удаления пыли и вредных газов, их масштабу, так и по методам удаления пыли и вредных газов. Очистка газов может быть механической (очистка от твердых частиц и капелек жидкости), сорбционной и основанной на химическом превращении вредных газов в безвредные (каталитическое окисление, термическое разложение и т.д.).

Выбор метода очистки газов определяется в первую очередь их химическими и физико-химическими свойствами, характером производства, свойствами участвующих в производстве веществ, объемом выбрасываемого газа и пыли, возможностью рекуперации или утилизации уловленных продуктов и т.п.

2.1. Механическая очистка газов

Выбрасываемые предприятиями химической и нефтехимической промышленности газовые смеси по агрегатному составу токсичных примесей можно классифицировать на грубодисперсные, аэрозольные и молекулярные. Грубодисперсная газовая смесь содержит твердые частицы размером 100 мкм и более. Аэрозоли содержат более мелкие частицы, взвешенные в воздухе или другом газе, например дымы имеют частицы размером 0,1-5 мкм, туманы состоят из капелек жидкости размером 10 мкм. Частицы аэрозоля, имея малую массу и большую поверхность, сорбируют заряженные частицы и вследствие этого способны перемещаться в электрическом поле, подобно ионам раствора. В молекулярных газовых системах токсичные примеси содержатся в виде газа или пара.

В химической промышленности для очистки воздуха от пыли и аэрозолей широко применяют пылеуловители следующих типов: *пылеосадительные камеры*, осаждение пыли в которых происходит преимущественно под действием сил гравитации; *циклоны*, в которых твердые частицы осаждаются под действием центробежных сил, возникающих в результате быстрого спирально-поступательного движения

газового потока вдоль ограничивающей поверхности аппарата (рис. 4); *промыватели*, в которых твердые частицы выделяются в результате инерционного осаждения на каплях и пленках промывающей жидкости; *фильтры* с перегородками, в которых используются эффекты касания инерции и ситовой; *электрофильтры*, в которых на взвешенные частицы действуют в основном электростатические силы (рис. 5)

В циклонах загрязненный воздух поступает через входной патрубок 1 (см. рис. 4) и движется вниз по кольцевому зазору между корпусом аппарата и входным устройством 2. При этом газовый поток закручивается в устройстве 3. Твердые частицы, получив ускорение, двигаются вдоль стенки корпуса аппарата вниз в бункер 4, а очищенный воздух через выходное устройство поднимается вверх. В циклонах эффективно улавливаются только крупные частицы.

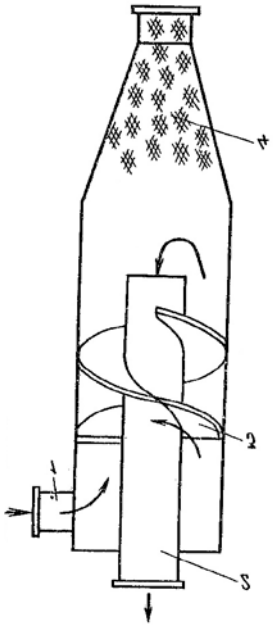

Рис. 4. Циклонный аппарат:
1 – входной патрубок; 2 – выход очищенного газа; 3 – закручивающее устройство; 4 – бункер для сбора пыли

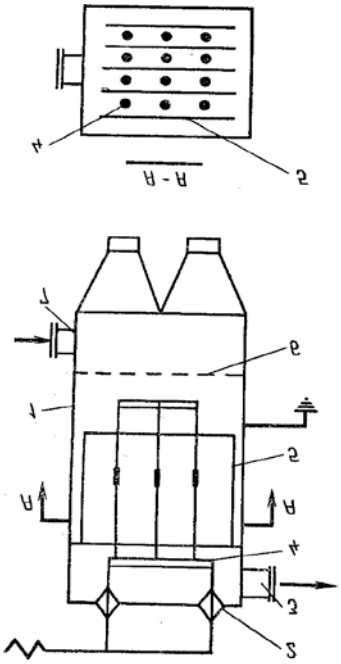

Рис. 5. Электрофильтр пластинчатый:
1 – камера; 2 – изолятор; 3 – выходной газ; 4 – рама с коронирующим электродом; 5 – осадительный электрод; 6 – распределительная решетка; 7 – входной газоход

Для тонкой очистки газов от пыли и тумана применяют мокрую очистку – промывку газов водой или другой жидкостью. Взаимодействие между жидкостью и запыленным газом (туманом) происходит либо на поверхности жидкой пленки, стекающей по вертикальной или наклонной плоскости (пленочные или насадочные скрубберы, демистры), либо на поверхности капель (полые скрубберы, скрубберы Вентури). Мокрую очистку газов применяют в том случае, когда допустимо увлажнение очищаемого газа.

В электрофильтрах к электродам прикладывается высокое, до нескольких десятков тысяч вольт, напряжение постоянного тока. Такая разность потенциалов между электродами приводит к ионизации молекул газа и образованию положительно заряженных ионов и электронов. Ионы движутся к отрицательному коронирующему электроду, а свободные электроны – к положительному осадительному электроду. Соприкасаясь со встречными пылинками и капельками, находящимися в газе, они сообщают последним свой заряд и увлекают их к осадительному электроду. В результате этого частицы пыли и тумана оседают на электроде. По мере накопления осевшую пыль удаляют встряхиванием электродов. При оседании тумана встряхивание, как правило, не требуется, потому что образовавшаяся жидкость самостоятельно стекает с электродов.

Конструкции электрофильтров весьма разнообразны. В представленном на рис.5 пластинчатом электрофильтре между параллельными поверхностями осадительных электродов 5 подвешены коронирующие электроды 4, выполненные из проволоки. Сверху коронирующие электроды подвешены к раме. Очищаемый газ по газоходу 7 подается под распределительную решетку 6, поднимается вверх между параллельными листами осадительных электродов, очищается и удаляется через выходной газоход 3.

Электрофильтры используют для удаления из газов трудноулавливаемой пыли и тумана. Степень очистки достигает 98%, а иногда 99,9%.

Таблица 2

Характеристики пылеуловителей основных типов

Пылеулавливающие устройства	Гидравлическое сопротивление, Па	Относительная стоимость очистки	Минимальный размер эффективно улавливаемых частиц, мкм
Пылеуловители (циклоны): - инерционные - центробежные	 100-300 750-1250	 1 2-3	 40 30
Промыватели	750-1500 5000-12500	2,5-4 7-15	2-5 0,1-1,0
Тканевые фильтры	750-1500	3-7,5	0,1
Электрофильтры	100-400	5-15	0,25-1,0

Характеристики пылеуловителей основных типов приведены в табл. 2. Эффективность пылеуловителя зависит от физико-химических свойств газовой среды и твердых частиц, их распределения по размерам, от типа пылеуловителя, параметров его работы и технического состояния. Ее определяют по отношению разности количеств твердых частиц на входе в пылеуловитель и выходе из него к их количеству на входе, %:

$$Э = \frac{C_{вх} - C_{вых}}{C_{вх}} \cdot 100. \qquad (10)$$

В табл. 3 приведены характеристики туманоуловителей основных типов. Для выделения из газовых потоков частиц капель жидкости предусмотрены устройства, принцип действия которых аналогичен принципу действия пылеуловителей. Различие заключается только в том, что все туманоуловители работают в режиме самоочищения, т.е. накапливаемая жидкость из этих устройств постоянно удаляется. При очистке туманов, образующихся при работе с растворами солей, для предотвращения кристаллизации солей и зарастания фильтровальных перегородок последние орошают водой или в фильтр вводят водяной пар.

Тип пыле- или туманоуловителя выбирают на основании данных о характере частиц (капелек) и их размере, требуемой эффективности очистки, допустимого гидравлического сопротивления, производительности установки и ее экономичности.

Таблица 3

Характеристики туманоуловителей основных типов

Туманоуловители	Скорость газа в активной зоне, м/с	Гидравлическое сопротивление, кПа	Эффективность очистки, %, для частиц с размером, мкм		
			до 1	1-3	3-10
Электрофильтры	0,3-1,5	0,1-0,3	75-95	90-99	98-100
Скрубберы Вентури	50-150	5,0-20,0	90-97	95-100	98-100
Волокнистые фильтры: - низкоскоростные - высокоскоростные	 0,01-0,1 1-10	 0,5-5,0 1,5-8,0	 92-99 50-85	 96-100 85-97	 100 95-100
Демистры	2,4-4,5	0,2-1,0	20-40	70-90	90-98

Пример 8. Выбрать тип пылеуловителя для механической очистки воздуха от пыли цеха грануляции и дыма силовой установки.

Решение. Из данных табл. 2 следует, что крупные частицы эффективно улавливаются в инерционных или центробежных пылеуловителях. Поэтому для очистки воздуха от пыли грануляции будут приемлемы инерционные либо центробежные пылеуловители. Наоборот, мелкие частицы дыма эффективно задерживаются в электрофильтрах.

Пример 9. Оценить концентрацию тумана на выходе из электрофильтра, если на очистку подается туман, минимальный размер частиц в котором 1 мкм, концентрация $C_{вх}$=10 г/м^3.

Решение. Согласно табл. 3, эффективность очистки такого тумана составляет 75-95%. По формуле (10) находим:

$$C'_{вых} = C_{вх} - \frac{ЭC_{вх}}{100} = 10 - \frac{75 \cdot 10}{100} = 2{,}5 \text{ г/м}^3;$$

$$C''_{вых} = 10 - \frac{95 \cdot 10}{100} = 0{,}5 \text{ г/м}^3.$$

Следовательно, на выходе из электрофильтра концентрация тумана составит 0,5-2,5 г/м^3.

2.2. Сорбционная очистка газов

Сорбцией называют поглощение твердым телом (адсорбция) или жидкостью (абсорбция) вещества из окружающей среды. Обратный процесс называют десорбцией; более часто его осуществляют повышением температуры или снижением давления сорбируемого вещества. Процессы сорбции проводят периодически (в аппаратах с неподвижным слоем сорбента) и непрерывно – в аппаратах с движущимся или кипящим слоем сорбента, а также в аппаратах с неподвижным слоем, если сорбционные установки имеют несколько параллельно включенных аппаратов.

Движущей силой адсорбции является разность исходного и равновесного парциальных давлений взаимодействующих компонентов, которая выражается формулой:

$$P_{ср} = \frac{(P'_Г - P'_Р) - (P''_Г - P''_Р)}{(P'_Г - P'_Р)(P''_Г - P''_Р)}, \qquad (11)$$

где $P'_г$, $P''_г$ – парциальные давления поглощаемого компонента в газовой фазе на входе в аппарат и на выходе из него; $P'_р$, $P''_р$ – равновесные парциальные давления поглощаемого компонента над жидкостью на ее входе в аппарат и на выходе из него.

Из выражения (11) следует, что по мере сближения парциальных давлений поглощаемой примеси в газовой фазе и на поверхности жидкости движущая сила процесса абсорбции уменьшается.

Сочетание абсорбции с десорбцией позволяет многократно применять поглотитель и выделять поглощенный компонент в чистом виде. Однако при очистке газов во многих случаях проводить десорбцию не обязательно, так как поглощенные вещества подлежат обезвреживанию.

На рис. 6 показана схема абсорбера. В абсорбер поступает очищаемый газ с парциальным давлением вверенного вещества $P'_г$, барботирует через слой жидкости (в виде пузырьков) и выходит из аппарата с минимальным парциальным давлением вредного вещества $P''_г$. Поглощающая жидкость противотоком поступает в аппарат через разбрызгиватель 1 и выходит через патрубок 4. Процесс абсорбции является гетерогенным, протекающим на границе газ-жидкость, поэтому для его ускорения применяют различные устройства, увеличивающие площадь контакта газа с жидкостью.

Для повышения эффективности очистки газов вместо растворителя применяют химические поглотители вредных газов, как правило, водные растворы электролитов (кислот, щелочей, солей). Так, для очистки газов от диоксида серы, сероводорода и метилмеркаптана их нейтрализуют раствором щелочи, в результате чего получают соль:

$$SO_2+2NaOH=Na_2SO_3+H_2O.$$

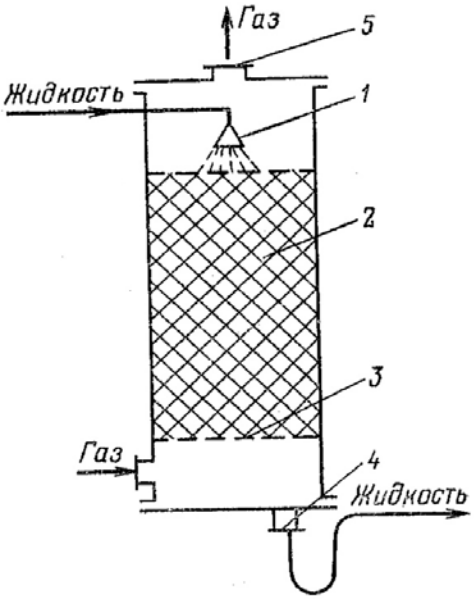

Рис. 6. Абсорбер: 1 – распределитель жидкости; 2 – насадка; 3 – опорная решетка; 4 – выход жидкости; 5 – выход очищаемого газа.

Адсорбционный метод поглощения получил развитие в последнее время в связи с освоением промышленного производства высокоэффективных адсорбентов: активных углей, силикагелей, синтетических цеолитов. Адсорбционный метод позволяет решить задачи глубокой очистки технологических и отходящих промышленных газов, содержащих разнообразные вредные вещества. Если правильно выбраны технологический регламент, схема и аппаратура процесса, примесь может быть удалена этим методом практически полностью. Кроме того, наряду с очисткой отходящих промышленных газов, адсорбционный метод позволяет еще улавливать и возвращать в технологический процесс некоторые ценные вещества, например растворители.

Адсорбенты характеризуются величиной поглотительной способности – величиной адсорбции (a, г/100 г) по конкретному веществу. Величина адсорбции зависит от свойств адсорбента и поглощаемого вредного вещества (адсорбтива). Кроме того, величина адсорбции зависит от внешних условий: давления пара вредного вещества в очищаемом газе и температуры.

Зависимость адсорбции от давления описывается уравнениями изотермы адсорбции. В случае мономолекулярной адсорбции на одной поверхности уравнение изотермы имеет вид:

$$a = \frac{a_m bP}{1 + bP}, \qquad (12)$$

где a – величина адсорбции при заданных условиях, моль/г; a_m – максимальная величина адсорбции для данного адсорбента, моль/г; b – адсорбционный коэффициент, Па$^{-1}$; P – давление пара токсичного компонента, Па.

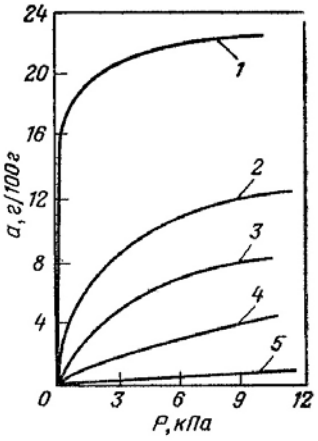

Рис. 7. Изотермы адсорбции диоксида углерода на активном угле при различной температуре, °С: 1 – 76,5 ; 2 – 0; 3 – 30; 4 – 50; 5 – 151,5

На рис. 7 в качестве иллюстрации уравнения (12) показана изотерма адсорбции диоксида углерода на активном угле при различной температуре.

Из уравнения (12) следует, что с увеличением парциального давления вредного вещества в газе растет величина адсорбции.

С увеличением температуры величина адсорбции уменьшается и наступает обратный процесс – десорбция. В табл. 4 представлена характеристика наиболее распространенных адсорбентов.

Наибольшее распространение в промышленности адсорбционные методы получили для улавливания различных растворителей. Улавливание растворителей проводят в рекуперационных установках. Степень извлечения растворителя обычно составляет 95-99%, а его остаточное содержание в отходящем из адсорбера газе не превышает 0,5 г/м^3. В качестве адсорбента в этом случае применяют только активный уголь, что обусловлено его гидрофобностью. Кроме того, активный уголь обладает высокой адсорбционной способностью по парам органических веществ, небольшой удерживающей способностью, достаточно прочен и т.п.

Таблица 4

Характеристика отечественных адсорбентов по поглощающей способности *a*, г/100 г

Адсорбент	Поглощение ацетилена при давлении, кПа		Поглощение диоксида углерода при давлении, кПа	
	6,65	93,10	6,65	93,10
Активные угли				
Газовый уголь АГ	1,4	6,3	1,0	5,5
Газовый уголь СКТ	3,2	12,7	2,0	10,0
Рекуперационый уголь АР	2,0	7,8	1,2	7,4
Силикагели				
Крупнопористый	0,4	3,8	0,4	2,0
Мелкопористый	1,6	4,8	-	-
Синтетические цеолиты				
Цеолит NaA	6,0	8,6	9,0	13,2
Цеолит CaA	6,6	9,4	13,8	16,8

Расходные коэффициенты на 1 т уловленного растворителя при его концентрации 10 г/м^3 приведены ниже:

Пар (0,3-0,5 мПа), т 2-3,5

Охлаждающая вода (15 °С), м^3.....30-50

Электроэнергия, кВт·ч 100-250

Активный уголь, кг 0,5-1,0

Продолжительность работы одной загрузки адсорбента, циклы...10000

Расходные коэффициенты при адсорбционном поглощении растворителя весьма значительны. Поэтому в настоящее время такие установки экономически оправданы только в случае поглощения и рекуперации дорогих и сильнотоксичных растворителей.

Производительность рекуперационных установок колеблется от 10 до 150 тыс. м^3 газа в 1 ч, а концентрация в нем растворителя изменяется от 0,5 до 20 г/м^3. Их используют в различных отраслях промышленности. Наряду с растворителями адсорбционные методы применяют для очистки отходящих газов от токсичных веществ: сульфида углерода, хлорорганических соединений, диоксида серы, паров ртути и других металлов.

Пример 10. Рассчитать емкость фильтра А по ацетилену, заполненному газовым углем СКТ в количестве Q=100 кг. Парциальное давление ацетилена на входе в фильтр $93{,}10\cdot10^3$ Па.

Решение. Из табл. 4 следует, что величина адсорбции в этих условиях составляет Q=12,7 г/100 г или a=0,127 кг/кг. Поскольку $A=aQ=0{,}127\cdot100=12{,}7$ кг; фильтр с таким количеством угля может поглотить до 12,7 кг ацетилена.

2.3. Каталитическая очистка газов

Каталитическая очистка газов заключается в обезвреживании газовых выбросов путем химического превращения вредных веществ, содержащихся в газе, в безвредные в присутствии катализатора. Для каталитической очистки газовый поток, как правило, пропускают через слой катализатора, соблюдая технологические условия эффективного превращения (температуру, расход газа и др.). Катализаторы обладают специфичностью действия, поэтому обезвреживанию подвергают только те компоненты, для которых они предназначены. Промышленные установки каталитической очистки газов с рекуперацией тепла рассчитаны на производительность 900-14000 м^3/ч. Они работают по типовой технологической схеме. Очищаемые газы проходят отбойники и ловушки для отделения взвешенных частиц и конденсата, захваченного газовым потоком. Затем газы нагревают (сначала в теплообменниках-рекуператорах, а потом в подогревателе) до температуры реакции и направляют в реактор, размер и конструкцию которого выбирают оптимальными для данного производства. Очищенные газы охлаждают и выпускают в атмосферу. Примером широко используемого процесса каталитического обезвреживания газовых выбросов является очистка

хвостовых газов от оксидов азота в производстве азотной кислоты. В реакторе каталитической очистки происходит обезвреживание газов по реакциям:

$$CH_4+0{,}5O_2=CO+2H_2+Q_1;$$
$$2NO_2+4H_2=N_2+4H_2O+Q_2;$$
$$2NO+2H_2=N_2+2H_2O+Q_3;$$
$$2CO+O_2=2CO_2+Q_4;$$
$$2H_2+O_2=2H_2O+Q_5.$$

Все эти реакции идут с выделением тепла, поэтому температура газа повышается до 690-730 °С в зависимости от содержания кислорода в поступающих на очистку хвостовых газах. С целью поддержания температуры выходящих из реактора каталитической очистки газов постоянной в него подают дополнительно либо воздух, либо природный газ. Выходящий из реактора очищенный газ содержит не более 0,005% (об.) оксидов азота и не более 0,1% (об.) оксида углерода.

Каталитический процесс позволяет очистить отходящие газы до ПДК воздуха при минимальных энергетических затратах. Основным аппаратом каталитического процесса очистки газов является реактор, работу которого характеризуют технологические параметры: расход газа $L_{расх}$, м^3/с, температура процесса обезвреживания $T_к$, концентрация токсичных примесей в поступающем C_0 и прошедшем через каталитический аппарат С, моль/м^3, газе. Размер слоя катализатора без учета потерь (толщина слоя δ, м) определяют по уравнению:

$$\delta = \frac{L_{расх}\left(C_0 - C\right)}{S_ф \rho_{нас} S_{уд} w_{хим}}, \qquad (13)$$

где $S_ф$ – площадь слоя катализатора, м^2; $\rho_{нас}$ – насыпная плотность катализатора (для гранулированных катализаторов), кг/м^3; $S_{уд}$ – удельная поверхность катализатора, м^2/кг; $w_{хим}$ – скорость гетерогенной каталитической реакции, моль/(м^2·с).

Скорость каталитической реакции зависит от природы компонентов в обезвреживаемом газе и катализатора, температуры процесса, а также от концентрации (парциального давления) токсичной примеси. Большинство каталитических реакций имеет дробный порядок, например окисление пропана на хромите меди описывается следующим кинетическим уравнением:

$$w_{C_5H_8} = KC_{C_3H_8}^{0\ 6}, \qquad (14)$$

где К – удельная скорость окисления пропана.

Абсолютные значения скоростей реакций могут различаться очень сильно, в соответствии с ними выбирают технологические параметры установок для обезвреживания газовых сред.

В табл. 5 приведены характеристики некоторых катализаторов окисления углеводородов, которые различаются по скорости реакции на несколько порядков. В практике, наряду со скоростью каталитической реакции, для оценки катализаторов применяют величину их производительности.

Таблица 5

Характеристика катализаторов окисления углеводородов (температура окисления 300 °С)

Состав	Удельная поверхность, $м^2/кг$	Скорость окисления метана, $моль/(м^2 \cdot с)$
CrO_3	$28{,}0 \cdot 1^{-3}$	0,08
MnO_2	$20{,}0 \cdot 10^{-3}$	0,2
Fe_2O_3	$16{,}2 \cdot 10^{-3}$	0,06
Co_3O_4	$7{,}7 \cdot 10^{-3}$	0,5

Производительность катализатора определяет количество обезвреживаемого токсичного вещества в кг в результате каталитической реакции за один час, приходящееся на 1 $м^3$ катализатора. Производительность современных катализаторов составляет 100-300 $кг/(м^3 \cdot ч)$.

По характеру осуществляемой в нейтрализаторах реакции катализаторы подразделяются на окислительные (называемые также дожигателями), восстановительные и трехкомпонентные или бифункциональные. В окислительных нейтрализаторах происходит окисление продуктов неполного сгорания – оксида углерода и углеводородов:

$$2CO+O_2 \rightarrow 2CO_2;$$
$$C_nH_m+(n+m/4)O_2 \rightarrow {}_nCO_2+(m/2)H_2O.$$

В восстановительных нейтрализаторах для глубокого восстановления оксидов азота необходимо, чтобы газ, поступающий в реактор, был слабо восстановленным или близким к нейтральному. В этом случае реакции восстановления оксидов азота в нейтрализаторе будут протекать достаточно полно:

$$2NO+2CO \rightarrow N_2+2CO_2;$$
$$2NO+2H_2 \rightarrow N_2+2H_2O.$$

При большом содержании кислорода в обезвреживаемых газах оксид углерода и водород реагируют в основном с кислородом и эффекта очистки выхлопных газов по оксидам азота не достигается.

Принцип действия трехкомпонентных нейтрализаторов основан на одновременной и достаточно эффективной очистке (до 80%) выхлопных газов бензиновых двигателей.

Пример 11. Рассчитать расход газа, содержащего метан в количестве 160 $г/м^3$ (C_0=10 $моль/м^3$), проходящего через каталитический реактор для достижения концентрации метана на выходе 1 $моль/м^3$.Реактор заполнен оксидом хрома слоем толщиной 0,5 м; площадь, занимаемая катализатором, составляет 0,5 $м^2$. Температура процесса 300 °С.

Решение. По табл. 5 определяем скорость каталитической реакции окисления метана w=0,8·10 $моль/(м^2 \cdot с)$ и удельную поверхность $S_{уд}=28 \cdot 10^3$ $м^2/кг$. По формуле (13) находим расход газа через реактор:

$$L_{расх} = \frac{\delta S_ф \rho_{нас} S_{уд} w_{хим}}{C_0 - C} = \frac{0{,}5 \cdot 0{,}5 \cdot 1{,}5 \cdot 28 \cdot 10^3 \cdot 0{,}8 \cdot 10}{10-1} = 1{,}05 \cdot 10^4 \ (м^3/с).$$

КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

Задание 1

1. Рациональное использование воздуха. Основные направления работ по снижению загрязнения атмосферы.

2. Влияние загрязненного воздуха на растительный мир.

3. *Задача*. Количество Cl_2, выделяющегося за 1 час из трубопровода $G=12\cdot10^{-3}$ кг/ч. Внутренний диаметр трубопровода D=500 мм, длина l=500 м, начальное давление в трубопроводе составляло $4\cdot10^{6}$ Па, Тн=Тк=293К. Рассчитать коэффициент негерметичности (m, $ч^{-1}$) и сделать вывод о герметичности трубопровода, если $m_{нормативный}=0{,}02\cdot10^{-2}$, $ч^{-1}$; η=2.

Задание 2

1. Основные принципы выбора метода очистки газовых выбросов от твердых частиц.

2. Влияние загрязненного воздуха на здоровье человека.

3. *Задача*. Рассчитать коэффициент негерметичности (m, $ч^{-1}$) емкости газообразного хлора объемом 120 $м^3$, имеющей рабочую температуру Тр=800К. Испытание емкости на герметичность проводили с использованием воздуха и установили G=8 кг/ч; Рн=$2{,}5\cdot10^{6}$ Па; коэффициент запаса η=1,5. Сделать вывод о герметичности, если $m_{нормативный}=0{,}07\cdot10^{-2}$, $ч^{-1}$.

Задание 3

1. Очистка топочных и отходящих газов от диоксида серы и азота.

2. Вредные вещества, определение, классификация.

3. *Задача.* Рассчитать коэффициент негерметичности емкости газообразного аммиака, объемом 50 $м^3$, имеющей рабочую температуру Тр=310К. Испытание емкости на герметичность проводили с использованием воздуха и установили G=3,3 кг/ч; Рн=$2\cdot10^{6}$ Па; η=2,0; $m_{нормативный}=0{,}5\cdot10^{-2}$ $ч^{-1}$. Дать заключение о герметичности емкости.

Задание 4

1. Очистка отходящих газов от диоксида углерода и мероприятия по снижению его выбросов в атмосферу (глобальное потепление).

2. Экотоксиканты: определение, примеры по альбому А.Дрейфуса.

3. *Задача*. Оценить концентрацию тумана на входе в электрофильтр, если на очистку подается туман с минимальным размером частиц – 1 мкм, концентрация частиц на выходе $C_{вых}=2$ г/$м^3$, эффективность туманоуловителя Э=85...93%.

Задание 5

1. Влияние антропогенных факторов на окружающую природную среду.

2. Классификация промышленных загрязнений и их влияние на здоровье человека.

3. *Задача.* Рассчитать коэффициент негерметичности ванны для получения вискозного волокна (m', $ч^{-1}$). Разрежение ванны ΔР=100 Па, а расход газа, отсасываемого из оборудования, 0,5 $м^3$/ч. Дать заключение о герметичности ванны, если $m_{нормативный}=4{,}5\cdot10^{-3}$, $ч^{-1}$.

Задание 6

1. Экотоксиканты, основные понятия и определения, обозначения по альбому Г. Дрейфуса

2. Эндемические заболевания (ЭЗ). Факторы, влияющие на возникновение ЭЗ, примеры.

3. *Задача*. Рассчитать емкость фильтра А по ацетилену, заполненному газовым углем СКТ в количестве Q=200 кг. Парциальное давление ацетилена на входе в фильтр $93{,}1\cdot10^3$ Па, при этом величина адсорбции а=0,127 кг/кг.

Задание 7

1. Природная среда: основные понятия и определения.

2. Критерии оценки чистоты или загрязнения воздушного бассейна.

3. *Задача*. Оценить концентрацию тумана на выходе из электрофильтра, если на очистку подается туман, минимальный размер частиц в котором 1 мкм; $C_{вх}$=10 г/$м^3$; Э=75...95%.

Задание 8

1. Биосфера: определение, размеры биосферы, основные компоненты. Учение В.И.Вернадского о биосфере.

2. Мероприятия по защите атмосферного воздуха от пыле- и газообразных выбросов.

3. *Задача.* Рассчитать количество CO_2, выделяющегося за 1 час из трубопровода с $D_{внутр}$=150 мм и длиной l=600 м. При испытаниях на герметичность в течение суток (24 ч) установлено, что давление в трубопроводе снизилось от $4{,}5\cdot10^5$ Па до $1\cdot10^4$ Па; Тн=Тк=303 К.

Задание 9

1. Основные методы и оборудование для механической очистки воздуха от загрязнений.

2. Вредные вещества в промышленности, классификация.

3. *Задача*. Количество Cl_2, выделяющегося за 1 ч из трубопровода $G=3\cdot10^{-3}$ кг/ч; диаметр трубы $D^{тр}_{внутр}$=100 мм, длина l=500 м. начальное давление $P_н=1\cdot10^5$ Па; $T_н=T_к$=293К. Рассчитать коэффициент негерметичности (m, $ч^{-1}$) и сделать вывод о герметичности трубопровода, если $m_{нормативный}=0{,}03\cdot10^{-2}$, $ч^{-1}$.

Задание 10

1. Основные химические методы, используемые для очистки воздуха от загрязнений.

2. Способы поступления вредных веществ в организм человека.

3. *Задача*. Оценить эффективность (Э, %) пылеуловителя, улавливающего пыль с размером частиц 3 мкм, если их концентрация на выходе составляет от 0,3 до 1,5 г/м^3, а на входе 13 г/м^3.

Задание 11

1. Основные методы и оборудование для очистки воздуха от загрязнений.

2. Отрицательное воздействие антропогенных загрязнений на здоровье человека.

3. *Задача.* Рассчитать коэффициент негерметичности ванны для получения штапельного волокна (m', ч$^{-1}$), если разрежение ванны (под вакуумом) ΔP=160 Па, а расход газа, отсасываемого из оборудования, составляет 0,8 м^3/ч. Дать заключение о герметичности ванны, если $m_{нормативный}=5\cdot10^{-3}$, ч$^{-1}$.

Задание 12

1. Каталитический метод очистки промышленных выбросов от загрязнений.

2. Загрязнение природной среды вредными веществами.

3. *Задача.* Рассчитать начальное ($P_н$, Па) давление в трубопроводе диаметром D=250 мм и длиной l=420 м, если при испытаниях на герметичность в течение 24 ч количество выделяющегося NO_2 $G=12\cdot10^{-4}$ кг/ч. Начальное давление принять равным $3\cdot10^6$ Па; $T_н=T_к$=313 К.

Задание 13

1. Принцип работы и устройство электрофильтра для очистки воздуха от пылевых загрязнений.

2. Загрязнение природной среды вредными физическими воздействиями.

3. *Задача.* Оцените концентрацию пыли на выходе электрофильтра, если на очистку подается пыль концентрации $C_{вх}$=12 г/м^3, а эффективность фильтра составляет Э=90...99%.

Задание 14

1. Миграция загрязнений.

2. Природные ресурсы: классификация по возобновимости.

3. *Задача.* Рассчитать расход газа, содержащего пропан в количестве 580 г/м^3, проходящего через каталитический реактор для достижения концентрации пропана на выходе 1,5 моль/м^3. Реактор заполнен оксидом железа Fe_2O_3, слоем толщиной σ=1,5 м, площадь катализатора 1,5 м^2. Скорость каталитической реакции окисления пропана ω=6 моль/(м$^2\cdot$с); $S_{уд}=16{,}2\cdot10^3$ м^2/кг; $\rho_{нас}$=1,6 кг/м^3.

Задание 15

1. Сорбционная очистка выбрасываемого предприятиями в атмосферу воздуха от вредных газов и пыли.

2. Биогеохимический цикл миграции вещества и энергии в природе.

3. *Задача.* Рассчитать толщину слоя катализатора (σ, м) из оксида марганца MnO_2, если через него пропускают ацетилен, для которого начальная концентрация C_0=2 моль/м^3, а конечная - C=1 моль/м^3. Расход газа через реактор $L_{расх}=1\cdot10^3$ м^3/с, площадь катализатора 1 м^2, скорость каталитической реакции окисления ацетилена ω=2 моль/(м^2·с), удельная поверхность катализатора $S_{уд}=20\cdot10^3$ м^2/кг, $\rho_{нас}$=1,5 кг/м^3.

Задание 16

1. Основные виды оборудования для абсорбционной очистки газов.

2. Ресурсный цикл: основные понятия и определения.

3. *Задача.* Рассчитать конечную концентрацию после очистки углеводородов в реакторе с оксидно-железным катализатором (Fe_2O_3 $S_{уд}=16{,}2\cdot10^3$ м^2/кг, $\rho_{нас}$=1,6 кг/м^3, $S_ф$=3 м^2, σ=0,5 м), если на входе их концентрация составляла 5 моль/м^3, скорость каталитической реакции $\omega=0{,}6\cdot10^{-1}$ моль/(м^2·с), расход очищаемого газа $3{,}5\cdot10^2$ м^3/с.

Задание 17

1. Основные виды оборудования для адсорбционной очистки газов.

2. Законы экологии Барри Коммонера, примеры их действия.

3. *Задача.* Рассчитать расход газа через реактор, поглощающий и обезвреживающий ацетилен, если толщина слоя катализатора составляет 1 м, концентрация ацетилена на входе C_0=7 моль/м^3, а на выходе 0,5 моль/м^3. Площадь MnO_2-катализатора 2,4 м^2, скорость каталитической реакции окисления ацетилена ω=0,2 моль/(м^2·с), удельная поверхность катализатора $S_{уд}=20\cdot10^3$ м^2/кг, $\rho_{нас}$=1,5 кг/м^3.

Задание 18

1. Экологические стандарты качества природной среды. Предельно-допустимые нормы антропогенного воздействия (ПДК, ПДУ).

2. Каталитическая очистка отходящих газов.

3. *Задача.* Рассчитать конечное давление в трубопроводе диаметром 60 мм и длиной 120 м, если при испытаниях на герметичность в течение суток количество выделившегося SO_3 составило $G=7\cdot10^{-3}$ кг/ч. Начальное давление принять равным $1\cdot10^6$ Па, $T_н$=300 К.

Задание 19

1. Основные понятия промышленной экологии (природно–промышленный комплекс, производственное предприятие, производственный процесс и др.).

2. Общая характеристика мониторинга природной окружающей среды.

3. *Задача.* Рассчитать количество SO_2, выделяющегося за τ=1 ч из трубопровода, $D_{внутр}$=100 мм и длиной l=100 м. При испытаниях на

герметичность в течение суток было установлено, что давление в трубопроводе снизилось от $1 \cdot 10^6$ Па до $9{,}909 \cdot 10^5$ Па. $T_н = T_к = 293$К.

Задание 20

1. Общая характеристика загрязнения окружающей среды в процессе производственной деятельности.

2. Основные направления природоохранной деятельности.

3. *Задача.* Рассчитать количество триоксида серы, выделяющегося за сутки из трубопровода, имеющего внутренний диаметр 120 мм и протяженность 150 м. При испытаниях на герметичность установлено, что давление SO_3 в трубопроводе снизилось с $1 \cdot 10^6$ Па до $8{,}1 \cdot 10^5$ Па. $T_к = 273$ К, $T_н = 295$ К.

ЛИТЕРАТУРА

1. Федеральный закон от 10.01.2002 г. № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды».

2. Закон «Об охране окружающей среды в Саратовской области» принят Саратовской областной думой 19.11.2003 г. № 638.

3. Введение в химию окружающей среды / Дж.Андруз, П.Бримблекумб, Т. Джиколз, П. Лисс. М.: Мир, 1992. 272 с.

4. Бримблекумб П. Состав и химия атмосферы / П. Бримблекумб. М.: Мир, 1988. 351 с.

5. Гусакова Н.В. Химия окружающей среды / Н.В. Гусакова. Ростов-н/Д.: Феникс, 2004. 192 с.

6. Вигдорович В.И. Химия и экология атмосферы: учеб. пособие / В.И. Вигдорович. Тамбов: Изд-во ТГУ им. Г.Р.Державина, 1998.156 с.

7. Лукин П.М. Химия окружающей среды / П.М. Лукин, П.И. Эндюскин. Чебоксары: Изд-во Чуваш. гос. ун-та,1999.143 с.

8. Тарасова Н.П. Дисперсные системы в атмосфере: учеб. пособие / Н.П. Тарасова. М.: Изд-во «Хронос» совместно с ВЦ РХТУ, 1994. 60 с.

9. Тарасов В.В. Мониторинг атмосферного воздуха: учеб.пособие / В.В. Тарасов, И.О. Тихонова, Н.Е.Кручинина. М.: Изд-во РХТУ, 2000. 97 с.

10. Тищенко Н.Ф. Охрана атмосферного воздуха. Расчет содержания вредных веществ и их распределение в воздухе: справ. издание / Н.Ф.Тищенко. М.: Химия, 1991. 368 с.

11. Путилов А.В. Охрана окружающей среды/ А.В.Путилов, А.А.Копреев, Н.В. Петрухин. М.: Химия, 1991. 224 с.

12. http://techn.sstu.ru/Biblioteka/