ГЛАВА 2
ЗАЩИТА АТМОСФЕРЫ

§ 9. НОРМИРОВАНИЕ ПРИМЕСЕЙ АТМОСФЕРЫ

Предельно допустимые концентрации (ПДК) примесей. Основной физической характеристикой примесей атмосферы является концентрация — масса (мг) вещества в единице объема ($м^3$) воздуха при нормальных условиях. Концентрация примесей определяет физическое, химическое и другие виды воздействия веществ на человека и окружающую среду и служит основным параметром при нормировании содержания примесей в атмосфере.

ПДК — это максимальная концентрация примеси в атмосфере, отнесенная к определенному времени осреднения, которая при периодическом воздействии или на протяжении всей жизни человека не оказывает ни на него, ни на окружающую среду в целом вредного действия (включая отдаленные последствия).

Если вещество оказывает на окружающую природу вредное действие в меньших концентрациях, чем на организм человека, то при нормировании исходят из порога действия этого вещества на окружающую природу.

Предельно допустимые концентрации загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных пунктов регламентированы списком Министерства здравоохранения СССР № 3086—84 от 27 августа 1984 г. с дополнениями, в соответствии с которым установлены: класс опасности вещества, допустимые максимальная разовая и среднесуточная концентрации примесей* (см. приложение I).

Максимальная разовая $ПДК_{max}$ — основная характеристика опасности вредного вещества. Она устанавливается для предупреждения рефлекторных реакций у человека (ощущение запаха, световой чувствительности, изменение биоэлектрической активности головного мозга и др.) при кратковременном воздействии атмосферных примесей. Среднесуточная $ПДК_{сс}$ установлена для предупреждения общетоксического, канцерогенного, мутагенного и другого влияния вещества на организм человека.

Приоритет научного обоснования допустимых концентраций

* Для вредных веществ, ПДК которых не утверждены Министерством здравоохранения СССР, определены ориентировочные безопасные уровни вредности (ОБУВ) загрязняющих веществ в атмосфере населенных пунктов. ОБУВ утверждается сроком на три года.

примесей в атмосфере принадлежит советским ученым и прежде всего В. Я. Рязанову. В табл. 22 приведены ПДК некоторых наиболее характерных веществ, загрязняющих атмосферный воздух в городах и населенных пунктах

Наибольшая концентрация c каждого вредного вещества в приземном слое не должна превышать максимально разовой предельно допустимой концентрации, т. е. $c \leqslant ПДК_{max}$, при экспозиции не более 20 мин. Если время воздействия вредного вещества превышает 20 мин, то $c \leqslant ПДК_{сс}$.

Таблица 22

Вещества	Класс опасности	Предельно допустимые концентрации, мг/м³	
		максимальная разовая	среднесуточная
NO_2	2	0,085	0,04
CO	4	5,0	3,0
Пыль неорганическая	3	0,15—0,5	0,05—0,15
Сажа	3	0,15	0,05
SO_2	3	0,5	0,05
H_2S	2	0,008	—
Бензин	4	5	1,5
Бенз(а)пирен	1	—	0,1 мкг/100 м³
HNO_3	2	0,4	0,15
Свинец и его соединения	1	—	0,0003

Примечание. В США $ПДК_{max}$ (часовая норма) вредных веществ составляет, мг/м³: по пыли — 0,12, по SO_2 — 0,75.

При одновременном присутствии в атмосфере нескольких вредных веществ, обладающих однонаправленным действием, их безразмерная суммарная концентрация должна удовлетворять условию:

$$c_1/ПДК_1 + c_2/ПДК_2 + \ldots + c_n/ПДК_n \leqslant 1, \qquad (1)$$

где $c_1, c_2, \ldots, c_n$ — концентрация вредных веществ в атмосфере в одной и той же точке местности, мг/м³; $ПДК_1, ПДК_2, \ldots, ПДК_n$ — предельно допустимые концентрации вредных веществ в атмосфере, мг/м³. Например, высоту труб современных ТЭС рассчитывают из условия, что концентрация SO_2 и NO_x в приземном слое атмосферы удовлетворяют условию

$$(c_{SO_2}/ПДК_{SO_2} + c_{NO_x}/ПДК_{NO_x}) \leqslant 1.$$

Эффектом однонаправленного действия обладают, например, такие вредные вещества, как диоксиды серы и азота; диоксид серы и сероводород; сильные минеральные кислоты (серная, соляная,

азотная); этилен, пропилен, бутилен, амилен; озон, диоксид азота, формальдегид и др. Максимальные концентрации вредных веществ определяют по разовым пробам, отобранным в течение 20 мин. Среднесуточные концентрации определяют либо как среднеарифметическое значение концентраций разовых проб, для которых устанавливают периодичность их отбора, либо из суточных концентраций, полученных непрерывно в течение 24 ч. Регламент отбора проб воздуха в населенных пунктах определен ГОСТ 17.2.3.01—86 (СТ СЭВ 1925—79).

Предельно допустимые выбросы (ПДВ) примесей. В соответствии с требованиями ГОСТ 17.2.3.02—78 для каждого проектируемого и действующего промышленного предприятия устанавливается предельно допустимый выброс вредных веществ в атмосферу при условии, что выбросы вредных веществ от данного источника в совокупности с другими источниками (с учетом перспективы их развития) не создадут приземную концентрацию, превышающую ПДК.

При определении ПДВ примеси от расчетного источника необходимо учитывать ее концентрацию в атмосфере, обусловленную выбросами от других источников, соблюдая для приземного слоя условие

$$c + c_ф \leqslant ПДК,$$

где c — концентрация вещества в приземном слое, создаваемая расчетным источником выброса; $c_ф$ — фоновая концентрация вещества.

Расчет ПДВ в тоннах за год как количества вредных веществ, которое не разрешается превышать при выбросе в атмосферу, производят на основе методов, разработанных Главной геофизической обсерваторией им. А. И. Воейкова и утвержденной Госкомгидрометом 10 марта 1981 г. с изменениями от 12 августа 1982 г. [26].

Устанавливаются также контрольные значения ПДВ в граммах за секунду, которые не должны превышаться в любой двадцатиминутный интервал времени. Кроме того, контроль ПДВ ведут в среднем за сутки, месяц, год.

ПДВ устанавливают для каждого источника загрязнения атмосферы. Для неорганизованных выбросов и совокупности мелких одиночных источников (вентиляционные выбросы, выбросы стационарных энергоустановок и т. п.) устанавливают суммарный ПДВ.

Если на данном предприятии или группе предприятий, расположенных в одном районе, значения ПДВ по объективным причинам не могут быть достигнуты в настоящее время, по согласованию с органами Госкомприроды СССР допускается планировать поэтапное, с указанием продолжительности каждого этапа, снижение выбросов до величин, обеспечивающих соблюдение ПДК. При этом значения временно согласованных выбросов (ВСВ) должны устанавливаться с учетом передового экологического опыта в техноло-

гии данного производства. ПДВ и ВСВ пересматривают не реже одного раза в пять лет.

Предельно допустимые выбросы транспортных средств с ДВС установлены ГОСТ 17.2.2.03—87, ГОСТ 21393—75*, ГОСТ 17.2.2.01—84, ГОСТ 17.2.2.02—86, ГОСТ 17.2 2.05—86 и др., а также отраслевыми стандартами (ОСТ 37.001.054—86, ОСТ 37.001.234—81, ОСТ 37.001.262—83 и др.).

После изготовления состав отработавших газов автомобиля с бензиновым ДВС должен соответствовать требованиям ОСТ 37.001.054—86 (табл. 23), который распространяется на серийные автомобили с полной массой не более 3500 кг и автобусы с числом мест не более 12.

Таблица 23

Контрольная масса автомобиля, кг	ПДВ вредных веществ, г/испытание*	
	CO	$C_nH_m+NO_x$
До 1020 вкл	62	23,8
Св. 1020 до 1250 вкл.	72	25,6
Св. 1250 до 1470 вкл	82	27,5
Св. 1470 до 1700 вкл.	91	29,4
Св. 1700 до 1930 вкл.	100	31,3
Св. 1930 до 2150 вкл	109	33,1
Св. 2150	119	35

* Испытания автомобилей проводятся по ездовому циклу, имитирующему движение автомобиля в городских условиях.

ОСТ 37.001.054—86 предусматривает снижение ПДВ в период 1990—1991 гг. Перспективные нормы выброса вредных веществ для серийных автомобилей приведены в табл. 24.

Таблица 24

Рабочий объем двигателя, л	ПДВ вредных веществ, г/испытание*		Год введения
	CO	$C_nH_m+NO_x$**	
>2,0 (с нейтрализатором)	30	7,8 (4,2)	1990
>2,0 (без нейтрализатора)	54	20 (7,2)	1990
1,4—2,0 (с нейтрализатором)	36	9,6	1991
1,4—2,0 (без нейтрализатора)	54	20 (7,2)	1991
<1,4 (без нейтрализатора)	54	18 (7,2)	1990

* См сноску к табл 23
** В скобках указано содержание NO_x в суммарном выбросе $C_nH_m+NO_x$.

Нормативные значения вредных выбросов, приведенные в табл. 23 и 24, соответствуют выбросам автомобилей с приводом на одну ось. Если автомобиль снабжен приводом на все колеса, то ПДВ вредных веществ увеличивается в 1,25 раза при массе автомобиля до 2000 кг и в 2 раза при массе более 2000 кг.

Состав отработавших газов автомобиля с бензиновым ДВС при эксплуатации на режиме холостого хода должен соответствовать требованиям ГОСТ 17.2.2.03—87 (табл. 25).

Таблица 25

Режим работы	ПДВ вредных веществ		
	CO, %	C_nH_m, млн$^{-1}$ для двигателей с числом цилиндров	
		до 4	св 4
Минимальное число оборотов на режиме холостого хода $n_{min\ xx}$	1,5	1200	3000
Повышенное число оборотов $n_{пов}$*	2,0	600	1000

* $n_{пов}$ устанавливается техническими условиями и указывается в инструкции на эксплуатацию автомобиля. Обычно $n_{пов}$ принимается в пределах от 2000 до 0,8 $n_{ном\ xx}$ об/мин, где обычно $n_{ном\ xx}$ — номинальное число оборотов на режиме холостого хода

После изготовления серийного автомобиля массой до 3500 кг с четырехтактным дизельным двигателем состав отработавших газов должен соответствовать требованиям ОСТ 37.001.054—86 (см. табл. 23 и 25), а для дизелей автомобилей массой свыше 3500 кг — ОСТ 37.001.234—81:

Вещество	Удельный выброс, не более, г/(кВт ч)
CO	9,5
C_nH_m	3,4
NO_x	18,35

ГОСТ 17.2.2.01—84 определены допустимые нормы дымности отработавших газов дизелей при стендовых испытаниях.

Условный расход отработавших газов, дм³/с	Дымность, %
до 42 вкл	60
св 42—50	56
св 50—75	50
св 75—100	45
св 100—125	41
св 125—150	39
св 150—175	37
св. 175—200	35
св 200	34

Условный расход отработавших газов $G_{ог}$ определяют по формулам: $G_{ог}=Vn/2$ — для четырехтактных двигателей; $G_{ог}=Vn$ — для двухтактных двигателей, где V — рабочий объем цилиндров дизеля, дм^3; n — частота вращения коленчатого вала, с$^{-1}$.

При эксплуатации дымность дизельных двигателей без наддува грузовых автомобилей (КамАЗ, МАЗ, КрАЗ и их модификаций) и автобусов должна соответствовать требованиям ГОСТ 21393—75* и не превышать 40% на режиме свободного ускорения двигателя и 15% — на максимальном числе оборотов двигателя в режиме холостого хода.

Суммарный выброс в атмосферу вредных веществ с отработавшими газами автомобильного транспорта определяется количеством эксплуатируемых (в городе, регионе, стране) автомобилей и концентрацией токсичных веществ в отработавших газах, при этом естественно, что рост числа эксплуатируемых автомобилей неизбежно требует повышения экологических показателей ДВС. В странах Западной Европы, США и Японии плотность эксплуатируемых транспортных средств с ДВС весьма высока и достигает, например, в Японии 132 автомобиля на 1 км^2 всей территории страны. Современные и перспективные нормативы на выброс токсичных веществ с отработавшими газами автомобилей приведены ниже:

Страна	США, Япония	СССР
Год введения норм	с 1981	с 1990
CO, г/км	2,11	6,14*
C_nH_m, г/км	0,25	0,77*
NO_x, г/км	0,62	0,86*

Международной организацией гражданской авиации (ИКАО) разработаны требования к токсичности выхлопных газов ГТДУ. Допустимые удельные массы $m_i/R_{взл}$ выброса загрязняющих веществ (углеводороды, оксид углерода и оксиды азота) определяются степенью повышения давления воздуха $\pi_к$ в компрессоре ГТДУ на взлетном режиме (рис. 7) и рассчитываются по формулам:

$$m_{C_nH_m}/R_{взл}=0{,}0625\,(0{,}92)^{\pi_к},\ \text{но не более } 0{,}0275\ \text{г/Н};$$

$$m_{CO}/R_{взл}=27/\pi_k^2,\ \text{но не более } 0{,}27\ \text{г/Н};$$

$$m_{NO_x}/R_{взл}=(3{,}2+0{,}08\pi_к)\,10^{-2},\ \text{но не более } 0{,}064\ \text{г/Н}.$$

Испытания ГТДУ проводят по взлетно-посадочному циклу, приведенному в табл. 26.

---

* Определено пересчетом нормативных требований, установленных ОСТ 37.001.054—86, для автомобилей с нейтрализатором объемом цилиндров ДВС более 2 л. Для автомобилей этого класса без нейтрализатора допустимые выбросы составят, г/км: CO — 11,19; C_nH_m — 2,71; NO_x — 1,48.

Таблица 26

Режим	Тяга	Время работы на режиме, мин
Холостой ход и руление перед взлетом, руление и холостой ход после посадки	0,07 $R_{взл}$	22
Взлет	$R_{взл}$	0,7
Набор высоты до 900 м	0,85 $R_{взл}$	2,2
Заход на посадку с высоты 900 м	0,3 $R_{взл}$	4

ГОСТ 17.2.2.04—86 устанавливает нормы выбросов с отработавшими газами несгоревших углеводородов, оксида углерода и оксидов азота при стендовых испытаниях ГТДУ самолетов гражданской авиации. Допустимые удельные выбросы загрязняющих веществ не должны превышать следующих значений, г/Н: углеводороды — 0,0196, оксид углерода — 0,118, оксиды азота — $(40+2\pi_к)10^{-3}$.

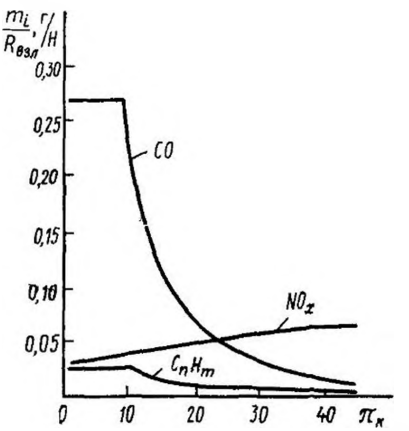

Рис 7 Зависимость отношения допустимого удельного выброса CO, NO_x и C_nH_m от степени повышения давления воздуха в компрессоре ГТДУ

§ 10. ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА ПЫЛЕУЛАВЛИВАНИЯ

Процесс очистки газов от твердых и капельных примесей в различных аппаратах характеризуется несколькими параметрами, в том числе общей эффективностью очистки η:

$$\eta = (c_{вх} - c_{вых})/c_{вх}, \qquad (2)$$

где $c_{вх}$ и $c_{вых}$ — массовые концентрации примесей в газе соответственно до и после пылеуловителя.

Если очистка ведется в системе последовательно соединенных аппаратов, то общая эффективность очистки:

$$\eta = 1 - (1 - \eta_1)(1 - \eta_2)\ldots(1 - \eta_n),$$

где η_1, η_2, η_n — эффективность очистки 1-го, 2-го и n-го аппаратов.

В ряде случаев используют понятие фракционной эффективности очистки:

$$\eta_i = (c_{вх_i} - c_{вых_i})/c_{вх_i},$$

где $c_{вх_i}$ и $c_{вых_i}$ — массовые концентрации i-й фракции загрязнителя до и после пылеуловителя.

Для оценки эффективности процесса очистки также используют коэффициент проскока K частиц через пылеуловитель:

$$K = c_{вых}/c_{вх}. \quad (3)$$

Как следует из формул (2) и (3), коэффициент проскока и эффективность очистки связаны соотношением. $K = 1 - \eta$.

При сравнительной оценке задерживающей способности пылеуловителей различных типов кроме общей и фракционной эффективности очистки используют понятие «медианной d_{50} тонкости очистки». Она определяется размерами частиц, для которых эффективность осаждения в пылеуловителе составляет 0,50.

Гидравлическое сопротивление пылеуловителей Δp определяют как разность давлений газового потока на входе $p_{вх}$ и выходе $p_{вых}$ из аппарата. Величину Δp находят экспериментально или рассчитывают по формуле

$$\Delta p = p_{вх} - p_{вых} = \zeta \rho w^2/2, \quad (4)$$

где ρ и w — соответственно плотность и скорость газа в расчетном сечении аппарата; ζ — коэффициент гидравлического сопротивления.

Если в процессе очистки гидравлическое сопротивление пылеуловителя изменяется (обычно увеличивается), то необходимо регламентировать его начальное $\Delta p_{нач}$ и конечное $\Delta p_{кон}$ значения. При достижении $\Delta p = \Delta p_{кон}$ процесс очистки нужно прекратить и провести регенерацию (очистку) пылеулавливающего устройства Последнее обстоятельство имеет принципиальное значение для фильтров.

Величина гидравлического сопротивления и объемный расход Q очищаемого газа определяют мощность N привода устройства для подачи газа к пылеуловителю:

$$N = k\Delta p Q/(\eta_м \eta_в), \quad (5)$$

где k — коэффициент запаса мощности; $\eta_м$ — КПД передачи мощности от электродвигателя к вентилятору; $\eta_в$ — КПД вентилятора.

Удельная пылеемкость пылеуловителя зависит от количества пыли, которое им удерживается за период непрерывной работы между двумя очередными регенерациями. Применительно к фильтрам удельную пылеемкость оценивают как массу осадка, приходящуюся на единицу площади рабочей поверхности фильтрующего элемента. Удельную пылеемкость используют в расчетах продолжительности работы фильтра между регенерациями.

При описании процессов фильтрации используют скорость фильтрации $w_ф$, равную отношению объемного расхода фильтруемого газа к площади фильтрования, $w_ф = Q/F_ф$. Скорость фильтрации позволяет оценить удельную массовую пропускную способность фильтрующих материалов $\rho w_ф$, где ρ — плотность фильтруемого газа. Для оценки скорости движения газа непосредственно в по-

рах фильтроэлемента используют понятие скорость в порах $w_п$. При этом $w_п = w_ф/П$, где П — пористость фильтроматериала.

В процессах пылеулавливания весьма важны физико-химические характеристики пылей и туманов, а именно: дисперсный (фракционный) состав, плотность, адгезионные свойства, смачиваемость, электрическая заряженность частиц, удельное сопротивление слоев частиц и др. Для правильного выбора пылеулавливающего аппарата необходимы прежде всего сведения о дисперсном составе пылей и туманов.

Результаты определения дисперсного состава пыли обычно представляют в виде зависимости массовых (иногда счетных) фракций частиц от их размера. Под фракцией понимают массовые (счетные) доли частиц, содержащихся в определенном интервале размеров частиц. Распределения частиц примесей по размерам могут быть различными, однако на практике они часто согласуются с логарифмическим нормальным законом распределения Гаусса (ЛНР). В интегральной форме это распределение описывают формулой

$$M(d_ч) = \frac{100}{\lg \sigma \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\lg d_ч} e^{-\frac{\lg^2(d_ч/d_{50})}{\lg^2 \sigma}} d \lg d_ч,$$

где $M(d_ч)$ — относительная доля частиц размером менее $d_ч$, d_{50} — медианный размер частиц, при котором доли частиц размером более и менее d_{50} равны; $\lg \sigma$ — среднеквадратичное отклонение в функции ЛНР. Графики ЛНР частиц обычно строят в вероятностно-логарифмической системе координат, текущий размер частиц откладывают на оси абсцисс, а на оси ординат — относительную долю частиц с размерами меньше $d_ч$. Шкалу оси абсцисс строят по логарифму диаметра частиц, а оси ординат — вычислением каждого из значений шкалы по уравнению

$$100 - M(d_ч) = \frac{100}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{y} e^{-y^2/2} dy,$$

где $y = \lg (d_ч/d_{50})/\lg \sigma$

Цифровые значения этой функции затабулированы и приводятся в сокращенном виде.

$M(d_ч)$, %	y	$M(d_ч)$, %	y
1	—2,326	50	0,0
5	—1,645	55	0,126
10	—1,282	60	0,253
15	—1,036	65	0,385
15,9	—1,00	70	0,524
20	—0,842	75	0,675
25	—0,675	80	0,824
30	—0,524	84,1	1,00
35	—0,384	85	1,036
40	—0,253	90	1,282
45	—0,126	95	1,645
		99	2,326

Если в этой системе координат интегральное распределение частиц по размерам описывается прямой линией, то данное распределение подчиняется ЛНР. В этом случае d_{50} находят как абсциссу точки графика, ордината которой

равна 50%, а $\lg \sigma$ — из уравнения $\lg \sigma = \lg d_{84,1} - \lg d_{50}$. Для характеристики пылей и сравнения их между собой достаточно иметь два параметра. d_{50} и $\lg \sigma$. Значение d_{50} дает средний размер частиц, а $\lg \sigma$ — степень полидисперсности пыли. В табл. 27 приведены значения d_{50} и $\lg \sigma$ для некоторых пылей

Таблица 27

Технологический процесс	Вид пыли	d_{50}, мкм	$\lg \sigma$
Заточка инструмента	Металл, абразив	38	0,214
Размол в шаровой мельнице	Цемент	20	0,468
Сушка угля в барабане	Каменный уголь	15	0,334
Экспериментальные исследования	Кварцевая пыль	3,7	0,405

По дисперсности пыли классифицированы на 5 групп: I — очень крупнодисперсная пыль, $d_{50} > 140$ мкм; II — крупнодисперсная пыль, $d_{50} = 40—140$ мкм; III — среднедисперсная пыль, $d_{50} = 10—40$ мкм, IV — мелкодисперсная пыль, $d_{50} = 1—10$ мкм; V — очень мелкодисперсная пыль, $d_{50} < 1$ мкм.

Важный параметр пыли — ее плотность. Различают *истинную* и *кажущуюся плотность* частиц пыли, а также *насыпную плотность* слоя пыли. Кажущаяся плотность частицы — это отношение ее массы к объему. Для сплошных (непористых) частиц значение кажущейся плотности численно совпадает с истинной плотностью. Насыпная плотность слоя пыли равна отношению массы слоя к его объему и зависит не только от пористости частиц пыли, но и от процесса формирования пылевого слоя. Насыпная плотность слежавшейся пыли примерно в 1,2—1,5 раза больше, чем у свеженасыпанной. Насыпная плотность слоя необходима для вычисления объема пыли в бункерах.

Склонность частиц пыли к слипаемости определяется ее адгезионными свойствами. Чем выше слипаемость пыли, тем больше вероятность забивания отдельных элементов пылеуловителя и налипания пыли на газоходах. Чем мельче пыль, тем выше ее слипаемость. Все пыли IV и V групп дисперсности практически относятся к слипающимся пылям, пыли II и III групп — к среднеслипающимся, а пыли I группы — к слабослипающимся. Слипаемость пыли значительно возрастает при ее увлажнении.

Смачиваемость частиц жидкостью (водой) влияет на работу мокрых пылеуловителей, а электрическая заряженность частиц — на их поведение в пылеуловителях и газоходах.

К общим параметрам пылеуловителей относят их производительность по очищаемому газу и энергоемкость, определяемую величиной затрат энергии на очистку 1000 м^3 газа.

§ 11. СУХИЕ ПЫЛЕУЛОВИТЕЛИ

Классификация пылеулавливающего оборудования основана на принципиальных особенностях процесса отделения твердых частиц от газовой фазы, это:

— оборудование для улавливания пыли сухим способом, к которому относятся циклоны, пылеосадительные камеры, вихревые циклоны, жалюзийные и ротационные пылеуловители, электрофильтры, фильтры,

— оборудование для улавливания пыли мокрым способом, к которому относятся скрубберы Вентури, форсуночные скрубберы, пенные аппараты и др.

Для очистки воздуха, удаляемого вентиляционными аспирационными системами от твердых и жидких примесей, применяют пылеуловители пяти классов (табл. 28).

Таблица 28

Класс пылеуловителя	Размеры улавливаемых пылевых частиц, мкм	Группа пыли по дисперсности	Эффективность пылеуловителя
I	Более 0,3	V	0,8
		IV	0,8—0,999
II	Более 2	IV	0,45—0,92
		III	0,92—0,999
III	Более 4	III	0,8—0,99
		II	0,99—0,999
IV	Более 8	II	0,95—0,999
		I	0,999
V	Более 20	I	0,99

Примечание. Границы эффективности пылеуловителей указаны с учетом дисперсности пыли Первое значение эффективности относится к меньшему значению d_{50}; второе — к большему.

Широкое применение для сухой очистки газов получили циклоны различных типов (рис. 8). Газовый поток вводится в циклон через патрубок *2* по касательной к внутренней поверхности корпуса *1* и совершает вращательно-поступательное движение вдоль корпуса к бункеру *4*. Под действием центробежной силы частицы пыли образуют на стенке циклона пылевой слой, который вместе с частью газа попадает в бункер. Отделение частиц пыли от газа, попавшего в бункер, происходит при повороте газового потока в бункере на 180°. Освободившись от пыли, газовый поток образует вихрь и выходит из бункера, давая начало вихрю газа, покидающему циклон через выходную трубу *3*. Для нормальной работы циклона необходима герметичность бункера. Если бункер негерметичен, то из-за подсоса наружного воздуха происходит вынос пыли с потоком через выходную трубу.

Все практические задачи по очистке газов от пыли с успехом решаются цилиндрическими (ЦН-11, ЦН-15, ЦН-24, ЦП-2) и коническими (СК-ЦН-34, СК-ЦН-34М и СДК-ЦН-33) циклонами НИИОГАЗа (Государственный научно-исследовательский институт по промышленной и санитарной очистке газов) [5, 30]. Конструк-

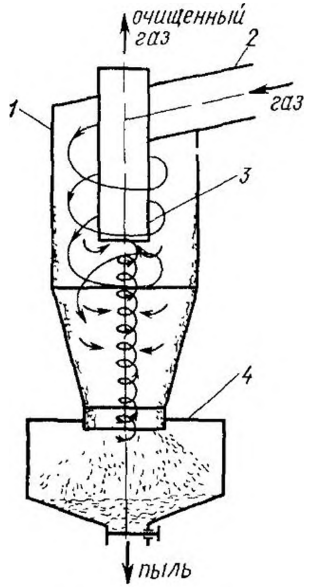

Рис. 8. Циклон

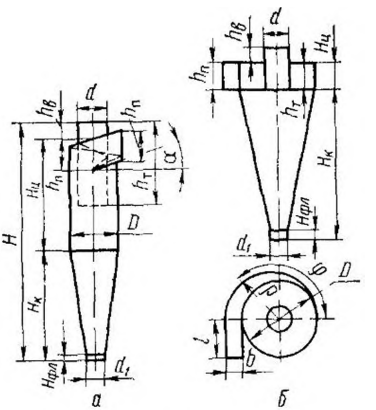

Рис. 9. Цилиндрический (*а*) и конический (*б*) циклоны НИИОГаза

тивные схемы и типовые размеры цилиндрических и конических циклонов НИИОГАЗа показаны соответственно на рис. 9 и в табл. 29 и 30. В СССР для циклонов принят следующий ряд внутренних диаметров D, мм: 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 1200, 1400, 1600, 1800, 2000, 2400 и 3000. В табл. 29 и 30 геометрические размеры цилиндрических и конических циклонов даны в долях внутреннего диаметра D.

Для всех циклонов бункеры имеют цилиндрическую форму диаметром $D_б$, равным 1,5 D для цилиндрических и (1,1—1,2) D для конических циклонов. Высота цилиндрической части бункера составляет 0,8 D, днище бункера выполняется с углом 60° между стенками, выходное отверстие бункера имеет диаметр 250 или 500 мм.

Избыточное давление газов, поступающих в циклоны, не должно превышать 2500 Па. Температура газов во избежание конденсации паров жидкости выбирается на 30—50°С выше температуры точки росы, а по условиям прочности конструкции — не выше 400°С. Производительность циклона зависит от его диаметра, увеличива-

ясь с ростом последнего. Эффективность очистки циклона серии ЦН падает с ростом угла входа в циклон. Так, при одних и тех же условиях работы получено:

$$\eta_{ЦН\text{-}15}/\eta_{ЦН\ 11} = 0{,}885, \text{ а } \eta_{ЦН\text{-}24}/\eta_{ЦН\text{-}11} = 0{,}795.$$

Цилиндрические циклоны НИИОГАЗа предназначены для улавливания сухой пыли аспирационных систем. Их рекомендуется ис-

Таблица 29

Геометрический размер	Тип циклона		
	ЦН 15	ЦН 24	ЦН 11
Угол наклона крышки и входного патрубка циклона α, град	15	24	11
Высота входного патрубка $h_п$	0,66	1,11	0,48
Высота выхлопной трубы $h_т$	1,74	2,11	1,56
Высота цилиндрической части циклона $H_ц$	2,26	2,11	2,06
Высота конуса циклона $H_к$	2,0	1,75	2,0
Общая высота циклона H	4,56	4,26	4,38
Высота внешней части выхлопной трубы $h_в$	—	0,59	—
Внутренний диаметр пылевыпускного отверстия d_1	—	0,3—0,4	—
Ширина входного патрубка в циклоне	—	0,2	—
Ширина входного патрубка на входе	—	0,26	—
Длина входного патрубка	—	0,6	—
Высота фланца $h_{фл}$	—	0,1	—

Таблица 30

Геометрический размер	Тип циклона		
	СДК-ЦН-33	СК ЦН 34	СК ЦН-34м
Высота цилиндрической части H и высота заглубления выхлопной трубы $h_т$	0,535	0,515	0,4
Высота конической части $H_к$	3,0	2,11	2,6
Внутренний диаметр выхлопной трубы d	0,334	0,340	0,22
Внутренний диаметр пылевыпускного отверстия d_1	0,334	0,229	0,18
Ширина входного патрубка b	0,264	0,214	0,18
Высота внешней части выхлопной трубы $h_в$	0,2—0,3	0,515	0,3
Высота установки фланца $h_{фл}$	0,1	0,1	0,1
Длина входного патрубка l	0,6	0,6	0,6
Высота входного патрубка $h_п$	0,535	0,2—0,6	0,4
Текущий радиус улитки ρ	$D/2+b\varphi/2\pi$	$D/2+b$	φ/π

пользовать для предварительной очистки газов и устанавливать перед фильтрами или электрофильтрами.

Циклоны ЦН-15 изготавливают в соответствии с ОСТ 26.14-1385—76 и ОСТ 26.14-1268—75 из углеродистой или низколегированной стали. Циклоны ЦН-15 и ЦП-2 во взрывоопасном исполнении изготавливают в соответствии с ОСТ 24.838.13—73.

Конические циклоны НИИОГАЗа серии СК, предназначенные для очистки газов от сажи, обладают повышенной эффективностью по сравнению с циклонами типа ЦН, что достигается за счет бо́льшего гидравлического сопротивления циклонов серии СК.

Для расчетов циклона НИИОГАЗа необходимы следующие исходные данные: объем очищаемого газа Q, м³/с, плотность газа при рабочих условиях ρ, кг/м³, вязкость газа при рабочей температуре μ, Па·с; дисперсный состав пыли d_{50} и $\lg \sigma_ч$; входная концентрация пыли $c_{вх}$, г/м³, плотность частиц пыли $\rho_ч$, кг/м³, требуемая эффективность очистки газа η

Расчет циклонов ведут методом последовательных приближений в следующем порядке

1 Задавшись типом циклона, определяют оптимальную скорость газа $w_{оп}$ в сечении циклона диаметром D по следующим данным

Тип циклона	ЦН-24	ЦН-15	ЦН-11	СДК-ЦН-33	СК-ЦН-34	СК-ЦН-34м
$w_{оп}$, м/с . .	4,5	3,5	3,5	2,0	1,7	2,0

2. Вычисляют диаметр циклона D (м) по формуле $D=\sqrt{4Q/\pi w_{оп}}$. Полученное значение D округляют до ближайшего типового значения внутреннего диаметра циклона Если расчетный диаметр циклона превышает его максимально допустимое значение, то необходимо применять два или более параллельно установленных циклона.

3. По выбранному диаметру циклона находят действительную скорость движения газа в циклоне, м/с $w=4Q/(\pi n D^2)$, где n — число циклонов. Действительная скорость в циклоне не должна отклоняться от оптимальной более чем на 15%

4 Определяют коэффициент гидравлического сопротивления одиночного циклона $\zeta=k_1k_2\zeta_{500}$, где k_1 — поправочный коэффициент на диаметр циклона (табл. 31), k_2 — поправочный коэффициент на запыленность газа (табл. 32); ζ_{500} — коэффициент гидравлического сопротивления одиночного циклона диаметром 500 мм. Значение выбирается из табл 33.

Таблица 31

Тип циклона	Значение k_1 для D, мм				
	150	200	300	450	500
ЦН-11	0,94	0,95	0,96	0,99	1,0
ЦН-15, ЦН-24	0,85	0,90	0,93	1,0	1,0
СДК-ЦН-33, СК-ЦН-34, СК-ЦН-34м	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

5. Гидравлическое сопротивление циклона вычисляют по формуле (4).

6. Эффективность очистки газа в циклоне:

$$\eta=0,5\,[1+\Phi(x)], \qquad (6)$$

где $\Phi(x)$ — табличная функция от параметра x, равного:

$$x = \lg\left(d_{50}/d^{\text{т}}_{50}\right)/\sqrt{\lg^2\sigma_{\text{т}} + \lg^2\sigma_{\text{ч}}}. \qquad (7)$$

Значения $d^{\text{т}}_{50}$ и $\lg\sigma_{\text{т}}$ для каждого типа циклона приведены ниже:

Тип циклона	ЦН-24	ЦН-15	ЦН-11	СДК-ЦН-33	СК-ЦН-34	СК-ЦН-34м
$d^{\text{т}}_{50}$, мкм	8,5	4,5	3,65	2,31	1,95	1,3
$\lg\sigma_{\text{т}}$	0,308	0,352	0,352	0,364	0,308	0,340

Значения $d^{\text{т}}_{50}$ определены по условиям работы типового циклона: $D_{\text{т}} = 0{,}6$ м; $\rho_{\text{ч т}} = 1930$ кг/м³, $\mu_{\text{т}} = 22{,}2\cdot10^{-5}$ Па·с; $w_{\text{т}} = 3{,}5$ м/с. Для учета влияния отклонений условий работы от типовых на величину d_{50} используют соотношение

$$d_{50} = d^{\text{г}}_{50}\sqrt{(D/D_{\text{г}})\,(\rho_{\text{чт}}/\rho_{\text{ч}})\,(\mu/\mu_{\text{г}})\,(w_{\text{г}}/w)}.$$

Таблица 32

Тип циклона	Значение k_2 при $c_{\text{вх}}$, г/м³						
	0	10	20	40	80	120	150
ЦН-11	1	0,96	0,94	0,92	0,90	0,87	—
ЦН-15	1	0,93	0,92	0,91	0,90	0,87	0,86
ЦН-24	1	0,95	0,93	0,92	0,90	0,87	0,86
СДК-ЦН-33	1	0,81	0,785	0,78	0,77	0,76	0,745
СК-ЦН-34	1	0,98	0,947	0,93	0,915	0,91	0,90
СК-ЦН-34М	1	0,99	0,97	0,95	—	—	—

Таблица 33

Тип циклона	Значения ζ_{500}		Тип циклона	Значения ζ_{500}	
	при выхлопе в атмосферу	при выхлопе в гидравлическую сеть		при выхлопе в атмосферу	при выхлопе в гидравлическую сеть
ЦН-11	245	250	СДК-ЦН-33	520	600
ЦН-15	155	163	СК-ЦН-34	1050	1150
ЦН-24	75	80	СК-ЦН-34М	—	2000

Определив по формуле (7) значение x, находим параметр Φ по данным:

x	—2,70	—2,0	—1,8	—1,6	—1,4	—1,2
$\Phi(x)$	0,0035	0,0228	0,0359	0,0548	0,0808	0,1151
x	—1,0	—0,8	—0,6	—0,4	—0,2	
$\Phi(x)$	0,1587	0,2119	0,2743	0,3446	0,4207	
x	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
$\Phi(x)$	0,5000	0,5793	0,6554	0,7257	0,7881	0,8413
x	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,7
$\Phi(x)$	0,8849	0,9192	0,9452	0,9641	0,9772	0,9965

Затем по формуле (6) определяют расчетное значение эффективности очистки газа циклоном. Если расчетное значение η окажется меньше необходи-

мого по условиям допустимого выброса пыли в атмосферу, то нужно выбрать другой тип циклона с большим значением коэффициента гидравлического сопротивления. Для ориентировочных расчетов можно пользоваться формулой

$$\frac{\zeta_1}{\zeta_2} = \left(\frac{1-\eta_1}{1-\eta^2}\right)^2 \frac{w_1}{w_2} \frac{D_2}{D_1},$$

где индексы 1 и 2 соответствуют двум разным циклонам.

Для очистки больших масс газов применяют батарейные циклоны, состоящие из большего числа параллельно установленных циклонных элементов. Конструктивно они объединяются в один корпус и имеют общий подвод и отвод газа. Опыт эксплуатации батарейных циклонов показал, что эффективность очистки таких циклонов несколько ниже эффективности отдельных элементов из-за перетока газов между циклонными элементами. Методика расчета батарейных циклонов приведена в работе [30]. Отечественная промышленность [5] выпускает батарейные циклоны типа БЦ-2, ЦБР-150у и др.

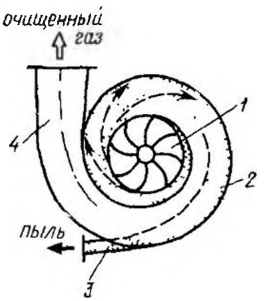

Рис. 10. Пылеуловитель ротационного типа:

1 — вентиляторное колесо; 2 — кожух, 3 — пылеприемное отверстие, 4 — выхлопная труба

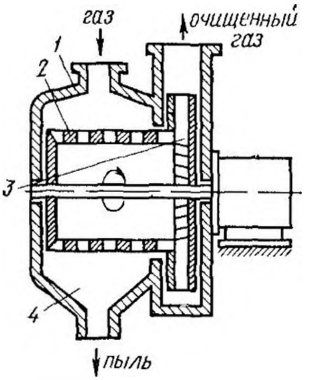

Рис. 11. Противопоточный ротационный пылеотделитель.

1 — кожух 2 — ротор, 3 — колесо вентилятора; 4 — бункер

Ротационные пылеуловители относят к аппаратам центробежного действия, которые одновременно с перемещением воздуха очищают его от фракции пыли крупнее 5 мкм. Они обладают большой компактностью, так как вентилятор и пылеуловитель обычно совмещены в одном агрегате. В результате этого при монтаже и эксплуатации таких машин не требуется дополнительных площадей, необходимых для размещения специальных пылеулавливающих устройств при перемещении запыленного потока обыкновенным вентилятором.

Конструктивная схема простейшего пылеуловителя ротационного типа представлена на рис. 10. При работе вентиляторного колес

1 частицы пыли за счет центробежных сил отбрасываются к стенке спиралеобразного кожуха *2* и движутся по ней в направлении выхлопного отверстия *3*. Газ, обогащенный пылью, через специальное пылеприемное отверстие *3* отводится в пылевой бункер, а очищенный газ поступает в выхлопную трубу *4*.

Для повышения эффективности пылеуловителей такой конструкции необходимо увеличивать переносную скорость очищаемого потока в спиральном кожухе (это ведет к резкому повышению гидравлического сопротивления аппарата) или уменьшать радиус кривизны спирали кожуха (это снижает его производительность). Такие машины обеспечивают достаточно высокую эффективность очистки воздуха при улавливании сравнительно крупных частиц пыли (свыше 20—40 мкм).

Более перспективными пылеотделителями ротационного типа, предназначенными для очистки воздуха от частиц размером >5 мкм, являются ПРП — противопоточные ротационные пылеотделители (рис. 11). Пылеотделитель состоит из встроенного в кожух *1* полого ротора *2* с перфорированной поверхностью и колеса вентилятора *3*. Ротор и колесо вентилятора насажены на общий вал. При работе пылеотделителя запыленный воздух поступает внутрь кожуха, где закручивается вокруг ротора. В результате вращения пылевого потока возникают центробежные силы, под действием которых взвешенные в воздухе частицы пыли стремятся выделиться из него в радиальном направлении. Одновременно на эти частицы в противоположном направлении действуют силы аэродинамического сопротивления. Частицы, центробежная сила которых больше силы аэродинамического сопротивления, отбрасываются к стенкам кожуха и поступают в бункер *4*. Очищенный воздух через перфорацию ротора всасывается в вентилятор и затем выводится наружу.

Эффективность очистки ПРП зависит от выбранного соотношения центробежной и аэродинамической сил и теоретически может достигать единицы. Величина центробежной силы является функцией числа оборотов и диаметра ротора, величина аэродинамической силы — функцией скорости просасывания воздуха через перфорацию ротора, т. е. производительность вентилятора.

Исходя из равенства центробежной силы и силы аэродинамического сопротивления воздуха движению частицы пыли, И. А. Шепелев получил формулу для определения производительности ПРП:

$$Q_V = 400\pi b w^2 \rho_п d_ч^2 / \rho_в \nu,$$

где $\rho_п$ и $\rho_в$ — плотность пыли и воздуха, кг/м^3; $d_ч$ — диаметр улавливаемых частиц, м; ν — коэффициент кинематической вязкости, м^2/с; w — окружная скорость, м/с; $b = id_0^2/8R$ — приведенная ширина всасывающего отверстия ротора пылеуловителя, м. Величина b — отношение суммы площадей поперечного сечения отверстий перфорации к длине окружности ротора ($2\pi R$); i — количество отверстий, шт.; d_0 — диаметр отверстий, м.

Диаметр минимальной улавливаемой частицы пыли в этом случае равен:

$$d_{min} = \frac{1}{20w} \sqrt{\frac{\rho_п \nu}{\rho_п} \frac{Q_V}{\pi b}}.$$

Сравнение ПРП с циклонами свидетельствует о преимуществах ротационных пылеуловителей. Так, габаритные размеры циклона в 3—4 раза, а удельные энергозатраты на очистку 1000 м³ газа на 20—40% больше, чем у ПРП при прочих равных условиях. Однако широкое распространение пылеуловители ротационного действия не получили из-за относительной сложности конструкции и процесса эксплуатации по сравнению с другими аппаратами сухой очистки газов от механических загрязнений.

Вихревые пылеуловители (ВПУ) также относят к аппаратам

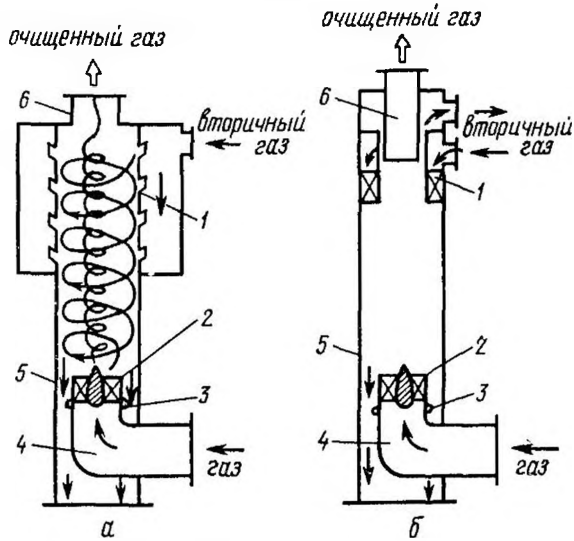

Рис. 12. Вихревой пылеуловитель соплового (*а*) и лопаточного (*б*) типа

центробежного действия. Отличительная особенность ВПУ — высокая эффективность очистки газа от тончайших фракций (<3—5 мкм), что позволяет им в отдельных случаях конкурировать с фильтрами. За рубежом (США, ФРГ) разработано несколько ВПУ с диаметром корпуса от 40 до 2 м, пропускная способность установок от 20 до 315 000 м³/ч.

Существуют две конструктивные разновидности ВПУ: сопловой (рис. 12, *а*) и лопаточный (рис. 12, *б*) типы. Процесс обеспыливания в таком пылеуловителе происходит следующим образом: запы

ленный газ поступает в камеру *5* через изогнутый патрубок *4*. Для предварительного закручивания запыленного газа в камеру *5* встроен лопаточный завихритель типа «розетки» *2*. В ходе своего движения вверх к выхлопному патрубку *6* газовый поток подвергается действию вытекающих из завихрителя *1* (наклонные сопла в ВПУ соплового типа, наклонные лопатки в ВПУ лопаточного типа) струй вторичного воздуха, которые придают потоку вращательное движение. Под действием центробежных сил, возникающих при закручивании потока, частицы пыли устремляются к его периферии, откуда спиральными струями вторичного потока перемещаются к низу аппарата в кольцевое межтрубное пространство. Безвозвратный спуск пыли в бункер обеспечивается подпорной шайбой *3*. Вторичный воздух в ходе спирального обтекания потока очищаемого газа постепенно проникает в него.

Подача вторичного воздуха кольцевым направляющим аппаратом с наклонными лопатками усложняет конструкцию, но обеспечивает более интенсивное закручивание потока газа и, как следствие, более высокую экономичность процесса очистки. Так, гидравлическое сопротивление ВПУ лопаточного типа у существующих аппаратов на 25% меньше, а остаточная концентрация пыли в 1,75 раза ниже, чем у ВПУ соплового типа.

Оптимальное количество вторичного воздуха находится в пределах 40—65% от количества очищаемого газа. ВПУ практически сохраняет эффективность очистки газа от пыли при уменьшении его расхода на 50% и увеличении — на 15%. Слабая чувствительность эффективности очистки к расходу запыленного газа объясняется тем, что процесс очистки в ВПУ зависит в основном от параметров вторичного воздуха. Если последние остаются неизменными, то окружная скорость потока запыленного газа не меняется, что сохраняет постоянной действующую на частицы пыли центробежную силу, определяющую эффективность очистки. Повышение давления вторичного воздуха в ВПУ приводит к увеличению эффективности очистки пыли. Гидравлическое сопротивление и удельный расход энергии ВПУ при этом соответственно возрастают. Оптимальное рабочее давление вторичного воздуха для существующих установок 2000—6000 Па.

В качестве вторичного потока может быть использован воздух окружающей среды (рис. 13, *а*), очищенный газ (рис. 13, *б*) или запыленный газ (рис. 13, *в*). С экономической точки зрения более выгодно использование загрязненного газа. В этом случае производительность установки повышается на 40—65% без заметного снижения эффективности очистки. Менее выгодным считается использование воздуха окружающей среды. В то же время этот вариант себя оправдывает при очистке горячих газов, нуждающихся в предварительном охлаждении. Максимальная эффективность очистки достигается при использовании в качестве вторичного воздуха переработанной части потока очищенного газа (рис. 13, *б*). В этом

случае часть наименее очищенного воздуха (у периферии потока) снова возвращается в ВПУ на доочистку.

Минимальный размер частиц, улавливаемых ВПУ, подсчитывают по приближенной зависимости:

$$d_{ч\,min} = 1{,}2\sqrt{Q_V \nu \rho_в / (H \rho_п \omega^2)},$$

где H — высота сепарационного объема, м; ω — окружная скорость вращения газа, м/с.

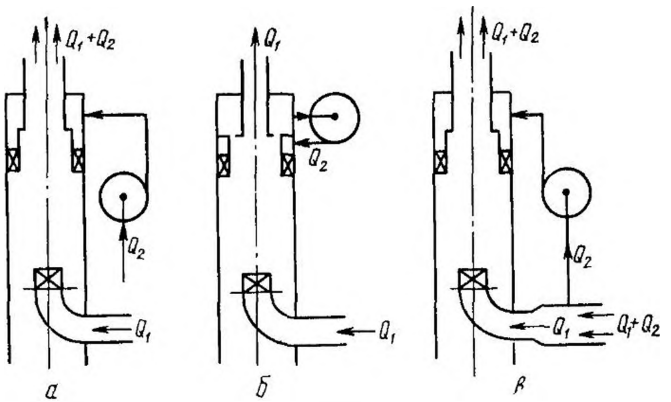

Рис. 13. Схемы подвода в ВПУ вторичного потока:

а — воздух окружающей среды; *б* — очищенный газ, *в* — запыленный газ

Гидравлическое сопротивление ВПУ имеет оптимальное в экономическом отношении значение при номинальных расходах запыленного газа Q_{V_1} и вторичного воздуха Q_{V_2}. Потери давления газа в ВПУ, определяющие величину расхода энергии на очистку газа, равны:

$$\Delta p_t = \frac{1}{Q_{V_1}}(Q_{V_1}\Delta p_1 + Q_{V_2}\Delta p_2),$$

где $Q_V = Q_{V_1} + Q_{V_2}$ — суммарный расход, м³/с; Δp_1 — перепад давления между входом и выходом из аппарата; Δp_2 — перепад давления вторичного воздуха (перепад давления газа в сопле и на входе в аппарат), Па.

Удельный расход энергии существующих ВПУ находится в пределах 0,4—1,3 кВт·ч на 1000 м³ воздуха. С увеличением габаритов ВПУ удельный расход энергии и эффективность очистки пыли заметно снижаются. Эффективность очистки пыли одного из ВПУ медианным диаметром $d_{50} = 40$ мкм (из них 86% с $d_ч < 5$ мкм) составила 0,96, а удельный расход энергии — 0,45 кВт·ч/1000 м³. При производительности (по запыленному газу) порядка 12 000 м³/ч гидравлическое сопротивление не превышает 1000 Па.

Суммарная эффективность очистки пыли в ВПУ практически

зависит от входной концентрации загрязнений в широком диапазоне ее изменения от 0 до 300 г/м³.

В радиальных пылеуловителях (рис. 14) отделение твердых частиц от газового потока происходит при совместном действии гравитационных и инерционных сил. Последние возникают при повороте газового потока на 180° за срезом входной трубы *2*. Средняя скорость подъема газа $w_г$ в корпусе *1* обычно не более 1 м/с, при этом для оседающих частиц должно выполняться условие $w_в > w_г$, где $w_в$ — скорость витания частиц. Эффективность очистки газа от частиц размером 25—30 мкм обычно составляет 0,65—0,85. Из-за малой эффективности радиальные пылеуловители не применяют для очистки от мелкодисперсной пыли.

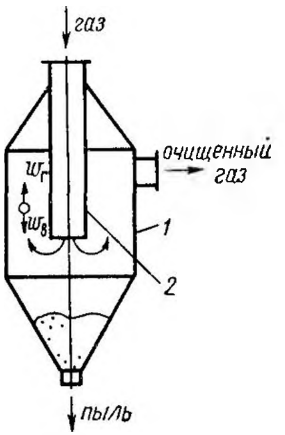

Рис 14. Радиальный пылеуловитель

Для разделения газового потока на очищенный газ и обогащенный пылью газ используют жалюзийный пылеотделитель (рис. 15). На жалюзийной решетке *1* газовый поток расходом Q разделяется на два потока расходом Q_1 и Q_2. Обычно $Q_1 = (0{,}8—0{,}9)Q$, а $Q_2 = (0{,}1—0{,}2)Q$. Отделение частиц пыли от основного газового потока на жалюзийной решетке происходит под действием инерционных сил, возникающих при повороте газового потока на входе в жалюзийную решетку, а также за счет эффекта отражения частиц от поверхности решетки при соударении. Обогащенный пылью газовый поток после жалюзийной решетки направляется к циклону, где очищается от частиц, и вновь вводится в трубопровод за жалюзийной решеткой. Жалюзийные пылеотделители отличаются простотой конструкции и хорошо компонуются в газоходах, обеспечивая эффективности очистки 0,8 и более для частиц размером бо-

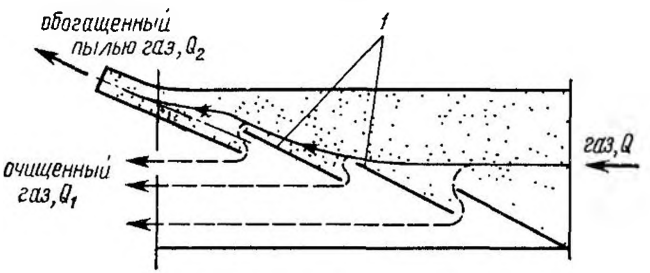

Рис. 15. Жалюзийчый пылеотделнтель

лее 20 мкм. Они применяются для очистки дымовых газов от крупнодисперсной пыли при температуре до 450—600°С. Методика расчета жалюзийных пылеотделителей приведена в работе [30].

§ 12. ЭЛЕКТРОФИЛЬТРЫ

Электрическая очистка — один из наиболее совершенных видов очистки газов от взвешенных в них частиц пыли и тумана. Этот процесс основан на ударной ионизации газа в зоне коронирующего разряда, передаче заряда ионов частицам примесей и осаждении последних на осадительных и коронирующих электродах.

Загрязненные газы, поступающие в электрофильтр, всегда оказываются частично ионизованными за счет различных внешних воздействий (рентгеновских и космических лучей, радиоактивных излучений, нагрева газа и др.), поэтому они способны проводить ток, попадая в пространство между двумя электродами. Сила тока зависит от числа ионов и напряжения между электродами. При увеличении напряжения в движение между электродами вовлекает-

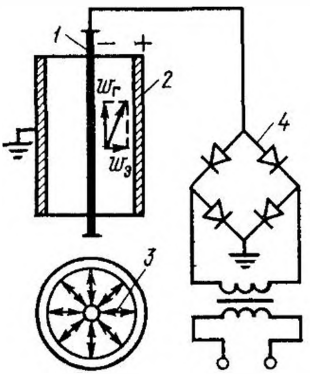

Рис. 16. Схема расположения электродов в электрофильтре

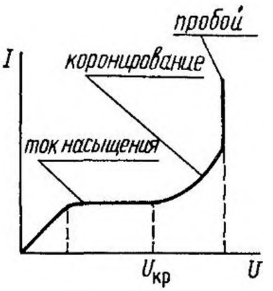

Рис. 17. Зависимость силы тока от напряжения между электродами

ся все большее число ионов и сила тока растет до тех пор, пока в движении не окажутся все ионы, имеющиеся в газе. При этом величина силы тока становится постоянной (ток насыщения), несмотря на дальнейший рост напряжения. При некотором достаточно большом напряжении движущиеся ионы и электроны настолько ускоряются, что, сталкиваясь с молекулами газа, ионизируют их, превращая нейтральные молекулы в положительные ионы и электроны. Образовавшиеся новые ионы и электроны ускоряются электрическим полем и, в свою очередь, ионизируют новые молекулы газа.

Этот процесс, названный *ударной ионизацией газа*, протекает устойчиво лишь в неоднородном электрическом поле, характерном для цилиндрического конденсатора (рис. 16). В зазоре между ко-

ронирующим *1* и осадительным *2* электродами создается электрическое поле убывающей напряженности с силовыми линиями *3*, направленными от осадительного к коронирующему электроду или наоборот. Напряжение к электродам подается от выпрямителя *4*.

Изменение силы тока между электродами по мере роста напряжения показано на рис. 17. Критическое напряжение $U_{кр}$ на электродах, при котором возникает коронирующий разряд, определяется соотношением

$$U_{кр} = E_{кр} R_1 \ln R_2/R_1,$$

где R_1 и R_2 — радиусы коронирующего и осадительного электродов соответственно, м; $E_{кр}$ — критическая напряженность электрического поля, при которой возникает корона, В/м.

Величину $E_{кр}$ определяют по эмпирическим формулам Пика. Для коронирующего электрода положительной полярности

$$E_{кр} = 3{,}37\,(\beta + 0{,}0242\sqrt{\beta/R_1})\,10^6, \qquad (8)$$

для коронирующего электрода отрицательной полярности

$$E_{кр} = 3{,}04\,(\beta + 0{,}0311\sqrt{\beta/R_1})\,10^6. \qquad (9)$$

В формулах (8) и (9) β — поправка на плотность газов в рабочих условиях, равная

$$\beta = \frac{(p_{окр} + p_г)\,293}{1{,}013 \cdot 10^5\,(273 + t)},$$

где $p_{окр}$ — давление окружающей среды, Па; $p_г$ — разрежение или избыточное давление в газоходе, Па; t — температура газов, °С. Формулы Пика получены для воздуха и электрода круглого сечения. Коронирующий разряд возникает обычно при высоких напряжениях, достигающих 50 кВ и более.

Аэрозольные частицы, поступающие в зону между коронирующим и осадительным электродами, адсорбируют на своей поверхности ионы, приобретая электрический заряд, и получают тем самым ускорение, направленное в сторону электрода с зарядом противоположного знака. Процесс зарядки частиц зависит от подвижности ионов, траектории движения и времени пребывания частиц в зоне коронирующего заряда Учитывая, что в воздухе и дымовых газах подвижность отрицательных ионов выше, чем положительных, электрофильтры обычно делают с короной отрицательной полярности. Время зарядки аэрозольных частиц невелико и измеряется долями секунды. Необходимо отметить, что частицы, поступающие в электрофильтр, обычно уже имеют небольшой заряд, полученный за счет трения о стенки трубопроводов и оборудования. Этот заряд (трубозаряд) не превышает 5% заряда, получаемого частицей при коронном разряде.

Движение заряженных частиц к осадительному электроду происходит под действием аэродинамических сил, силы взаимодействия

электрического поля и заряда частицы, силы тяжести и силы давления электрического ветра.

Под действием аэродинамических сил частица движется по направлению основного потока газа со скоростью $w_г$, близкой к скорости газа, которая составляет 0,5—2 м/с. Основной, вызывающей движение частицы к осадительному электроду, является сила взаимодействия между электрическим полем и зарядом частицы. Расчеты скорости этого движения $w_э$ показывают, что ее значение зависит главным образом от размеров частиц и напряженности электрического поля E. Расчетные значения скорости приведены ниже:

Диаметр частиц, мкм	0,4	1,0	2,0	10,0	30,0
$w_э$, м/с, при $E=15\cdot10^4$ В/м .	0,012	0,013	0,015	0,075	0,10
$w_э$, м/с, при $E=30\cdot10^4$ В/м	0,025	0,030	0,060	0,50	0,60

Сила тяжести не оказывает заметного влияния на траекторию движения частиц пыли. За время пребывания в электрофильтре (10—15 с) частицы размером 10 мкм падают всего на 3—5 см, поэтому в расчетах силу тяжести обычно не учитывают.

Электрический ветер, возникающий в местах генерации ионов, т. е. у коронирующих электродов, и вызывающий циркуляцию газа в межэлектродном промежутке со скоростью до 0,5—1,0 м/с, обусловлен механическим воздействием движущихся ионов на молекулы газа и частиц пыли. Этот ветер оказывает влияние на движение частиц к осадительным электродам и на перемешивание ионов и взвешенных частиц в межэлектродном пространстве. Однако из-за отсутствия методики расчета скорости электрического ветра его влиянием на движение частиц пренебрегают.

Таким образом, отрицательно заряженные аэрозольные частицы движутся к осадительному электроду под действием аэродинамических и электрических сил, а положительно заряженные частицы оседают на отрицательном коронирующем электроде. Ввиду того, что объем внешней зоны коронного разряда во много раз больше объема внутренней, большинство частиц пыли получает заряд отрицательного знака. Поэтому основная масса пыли осаждается на положительном осадительном электроде и лишь относительно небольшая — на отрицательном коронирующем электроде.

Важное значение на процесс осаждения пыли на электродах имеет электрическое сопротивление слоев пыли. По величине электрического сопротивления различают.

1) пыли с малым удельным электрическим сопротивлением ($<10^4$ Ом·см), которые при соприкосновении с электродом мгновенно теряют свой заряд и приобретают заряд, соответствующий знаку электрода, после чего между электродом и частицей возникает сила отталкивания, стремящаяся вернуть частицу в газовый поток. Противодействует этой силе только сила адгезии и, если она оказывается недостаточной, то резко снижается эффективность процесса очистки;

2) пыли с удельным электрическим сопротивлением от 10^4 до 10^{10} Ом·см хорошо осаждаются на электродах и легко удаляются с них при встряхивании;

3) пыли с удельным электрическим сопротивлением более 10^{10} Ом·см труднее всего улавливаются в электрофильтрах, так как на электродах частицы разряжаются медленно, что в значительной степени препятствует осаждению новых частиц.

В реальных условиях снижение удельного электрического сопротивления пыли можно осуществить увлажнением запыленного газа.

Теоретическое определение эффективности очистки запыленного газа в электрофильтрах обычно проводят по формуле Дейча:

$$\eta = 1 - e^{-w_э F_{уд}}, \qquad (10)$$

где $F_{уд}$ — удельная поверхность осадительных электродов, равная отношению поверхности осадительных элементов к расходу очищаемых газов в м²·с/м³. Из формулы (10) следует, что эффективность очистки газа в электрофильтрах возрастает с ростом значения показателя степени $w_э F_{уд}$:

$w_э F_{уд}$	3,0	3,7	3,9	4,6
η	0,95	0,975	0,98	0,99

Конструкцию электрофильтров определяют следующие условия работы состав и свойства очищаемых газов, концентрация и свойства взвешенных частиц, параметры газового потока, требуемая эффективность очистки и т. д.

В промышленности используют несколько типовых конструкций сухих и мокрых электрофильтров [30], применяемых для очистки технологических выбросов.

Сухие электрофильтры типа УГМ (унифицированные горизонтальные малогабаритные) рекомендуется применять для тонкой очистки газов от пыли различных видов. В корпусе электрофильтра установлены коронирующие и осадительные электроды. Равномерный подвод газа к электродам достигается установкой распределительной решетки на входе в фильтр. Периодическая очистка коронирующих и осадительных электродов производится встряхивающим механизмом. Технические характеристики электрофильтра типа УГМ приведены в табл. 37.

На рис. 18 показана конструктивная схема мокрого электрофильтра типа *С*. В корпусе *3* установлены коронирующие и осадительные электроды *2*, к которым подводится газ через распределительные решетки *1*. В верхней части фильтра установлены смолоулавливающие зонты *4*. Уловленная на электродах смола стекает в бункер и через гидрозатвор выводится из аппарата. При загустении смолы аппарат разогревают паром. Технические характеристики электрофильтров типа С приведены в табл. 37.

Для очистки вентиляционных выбросов от различных пылей с малой концентрацией загрязнений применяются двухзонные элек-

трофильтры типа ФЭ, РИОН и др. Поток воздуха в таком фильтре проходит последовательно зоны ионизации и осаждения, а также противоуносный пористый фильтр. Накопленная пыль периодически смывается водой. Принципиальная схема двухзонного электрофильтра показана на рис. *19*. Загрязненный газ проходит ионизатор, в состав которого входят положительные *1* и отрицательные *2* электроды. Ионизатор выполнен так, чтобы при скорости ~2 м/с частицы пыли успели зарядиться, но еще не осели на электроды. Зарядившиеся частицы газовым потоком увлекаются в осадитель, представляющий собой систему пластин-электродов *3* и *4*. Заряжен-

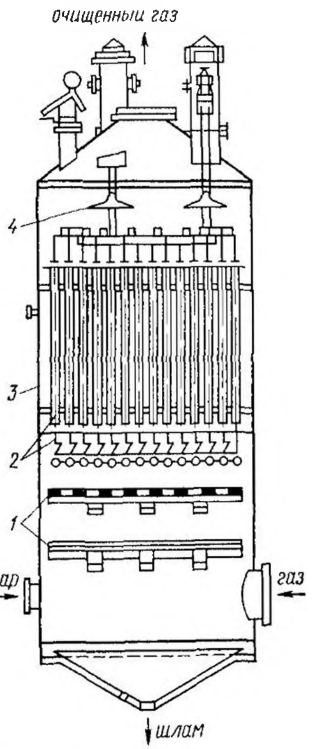

Рис. 18. Электрофильтр типа С

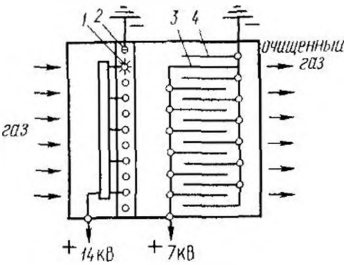

Рис. 19 Схема двухзонного электрофильтра

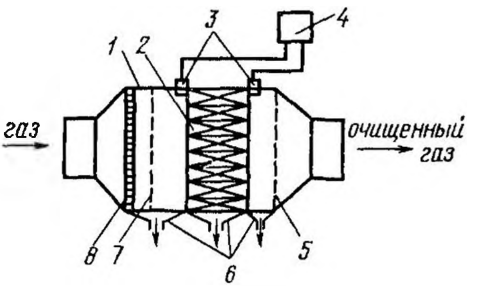

Рис. 20. Туманоуловитель УУП

ные частицы оседают в поле осадителя на пластинах противоположной полярности. Выбором расстояния между пластинами (6—7 мм) удается при сравнительно небольшом напряжении между пластинами (7 кВ) получить напряженность 80—100 В/м, что достаточно для осаждения частиц субмикронных размеров.

Для очистки вентиляционных выбросов от пыли, туманов минеральных масел, пластификаторов и т. п. в ЦНИИпромзданий

разработаны электрические туманоуловители типа УУП (рис. 20). В корпусе *1* установлен электрический туманоуловитель *2* типа ФЭ, который питается от источника *4* напряжением 13 кВ. Подвод питания к электродам производится через высоковольтные электроизоляторы с клеммами *3*. Загрязненный воздух через входной патрубок, распределительную решетку *8* и сетку *7* поступает к туманоуловителю, очищается от примесей и, пройдя каплеуловитель *5*, подается на выход УУП. Жидкость, отделенная от воздуха, собирается в воронках *6*, а затем сливается из УУП через гидрозатворы. УУП сочетают высокую эффективность улавливания примесей с низким гидравлическим сопротивлением.

Эксплуатационные характеристики электрофильтров весьма чувствительны к изменению равномерности поля скоростей на входе в фильтр. Для получения высокой эффективности очистки необходимо обеспечить равномерный подвод газа к электрофильтру за счет правильной организации подводящего газового тракта и применения распределительных решеток во входной части электрофильтра.

При использовании электрофильтров для очистки воздуха от аэрозолей горючих веществ необходимо, чтобы максимальная температура аэрозольной смеси была на 20—25°С ниже температуры вспышки улавливаемой жидкости, а возможная максимальная концентрация горючей жидкости в аэрозольной смеси — не менее чем на один порядок меньше нижнего концентрационного предела воспламенения данной смеси. Это позволяет устранять возможность воспламенения фильтрата в электроуловителе.

§ 13. ФИЛЬТРЫ

Фильтры широко используют для тонкой очистки газовых выбросов от примесей.

Процесс фильтрования состоит в задержании частиц примесей на пористых перегородках при движении через них дисперсных сред. Принципиальная схема процесса фильтрования в пористой перегородке показана на рис. 21. Фильтр представляет собой корпус *1*, разделенный пористой перегородкой (фильтроэлементом) *2* на две полости. В фильтр поступают загрязненные газы, которые очищаются при прохождении фильтроэлемента. Частицы примесей оседают на входной части пористой перегородки и задерживаются в порах, образуя на поверхности перегородки слой *3*, и таким образом становятся для вновь поступающих частиц частью фильтровой перегородки, что увеличивает

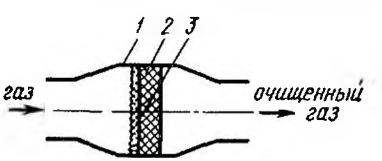

Рис. 21. Схема процесса фильтрования

эффективность очистки фильтра и перепад давления на фильтроэлементе. Осаждение частиц на поверхность пор фильтроэлемента происходит в результате совокупного действия эффекта касания, а также диффузионного, инерционного и гравитационного процессов.

Эффект касания возникает при условии соприкосновения частиц примесей с поверхностью волокон, зерен или других элементов, образующих поверхность пор. Соприкосновение происходит при условии, что траектория движения частиц примесей проходит от поверхности пор на расстоянии не более радиуса частицы. Эффективность очистки касанием $\eta_к$ определяется соотношением характерных размеров пор $d_п$ и частиц $d_ч$. При $d_ч > d_п$ наблюдается отсеивание частиц входной поверхностью фильтра (ситовый эффект) с образованием слоя осадка.

Процесс осаждения частиц на поверхность пор за счет броуновской диффузии обусловлен хаотическим тепловым движением молекул газа, постоянно соударяющихся с частицами примесей. В результате таких соударений частицы смещаются с линий тока и осаждаются на поверхности пор. Чем меньше частицы и меньше скорость их движения, тем эффективнее протекает процесс захвата частиц за счет броуновской диффузии. Экспериментально доказано, что процесс захвата частиц броуновской диффузией становится заметным при $d_ч < 0{,}1$ мкм и скорости их движения менее 1 м/с.

Процесс инерционного осаждения частиц примесей на поверхности пор фильтроэлемента происходит из-за воздействия на частицы сил инерции, возникающих при отклонении линии тока от прямолинейного движения. При огибании потоком криволинейной поверхности пор частицы, стремясь сохранить свое прямолинейное движение, сходят с линии тока и касаются поверхности пор. Многочисленные исследования показали, что инерционный эффект осаждения частиц зависит от величины критерия Стокса и критерия Рейнольдса:

$$\eta_и = f(\mathrm{St},\ \mathrm{Re}),$$

где $\mathrm{St} = d_ч^2 w_ф \rho_ч k_к / (18 d_п \mu_г)$ — критерий Стокса; $\rho_ч$ — плотность частиц; $w_ф$ — скорость фильтрации; $k_к$ — поправка Кенингема—Милликена на увеличение подвижности частиц, размер которых сравним со средней длиной свободного пробега $l_м$ газовых молекул:

$$k_к = 1 + \left(1{,}257 + 0{,}4e^{-0{,}55 d_ч / l_м}\right) 2 l_м / d_ч \text{ при } l_м = \mu (\pi M / 2 R_г T)^{0{,}5} / \rho_г,$$

где M — масса 1 моль газа; $R_г$ — газовая постоянная; T — температура газа, К.

Значения поправки $k_к$ на скольжение приведены ниже:

$d_ч$, мкм	0,003	0,01	0,03	0,1	0,3	1,0	3,0	10,0 и более
$k_к$	90	24,5	7,9	2,9	1,57	1,16	1,03	1,00

Зависимость эффективности очистки газов за счет инерционного эффекта $\eta_и$ от числа Стокса, полученная в опытах с захватом час-

тиц отдельными волокнами, показана на рис. 22. Эти графики можно использовать для расчета эффективности волокнистых фильтроэлементов. Возникновение режима инерционного осаждения частиц на поверхности пор фильтроэлемента характеризуется критическим числом $St_{кр}$; при $St < St_{кр}$ $\eta_и = 0$. Для условий вязкого обтекания цилиндра при $Re = 0{,}1$ критическое число Стокса равно $4{,}3 \pm 0{,}1$. Рост числа Рейнольдса газового потока приводит к снижению значений $St_{кр}$ до 0,1—0,2. Инерционный эффект осаждения частиц практически отсутствует при движении частиц размером менее 1 мкм со скоростью менее 1 м/с.

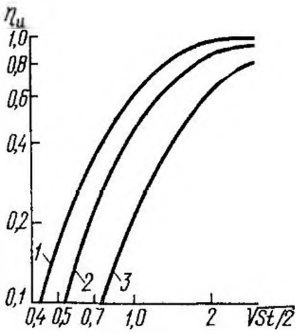

Рис. 22 Зависимость $\eta_и$ от числа St:
1 — Re=150, 2 — Re=30; 3 — Re<0,2

Процесс гравитационного осаждения частиц на поверхность пор может происходить в результате их оседания со скоростью витания. Эффективность очистки за счет этого эффекта $\eta_г$ для цилиндра, расположенного горизонтально поперек потока, определяется соотношением

$$\eta_г = w_в / w_г = St/2Fr.$$

Здесь $Fr = w_в^2/d_ц g$ — критерий Фруда, где $w_в$ — скорость витания частиц; $d_ц$ — диаметр цилиндра.

В реальных фильтрах вследствие малых скоростей витания частиц по сравнению со скоростью фильтрации гравитационный механизм осаждения частиц не играет заметной роли. Этот эффект становится заметным лишь при фильтрации аэрозоля с частицами диаметром 1 мкм со скоростью менее 0,05 м/с.

Общая эффективность очистки газового потока η с учетом всех рассмотренных процессов осаждения частиц на поверхность пор может быть найдена по формуле

$$\eta = 1 - (1 - \eta_к)(1 - \eta_д)(1 - \eta_и)(1 - \eta_г).$$

При определении общей эффективности очистки газа (или коэффициента проскока) на фильтроэлементе необходимо учитывать, что процесссы осаждения частиц на поверхности пор в значительной степени зависят от размера частиц примесей, скорости фильтрации, величины пор фильтроэлемента, состояния поверхности пор, параметров газового потока и др. Опыты, приведенные на фильтроэлементах из стеклянных волокон размером 1,5 мкм (рис. 23), указывают на экстремальный характер зависимости коэффициента проскока K частиц от их размера и скорости фильтрации. Восходящие ветви левой части кривых относятся к области доминирующего значения диффузного процесса осаждения, нисходящие ветви относятся к частицам, в осаждении которых все большую роль начинает играть эффект инерционного осаждения.

Из рис. 23 видно, что рост скорости фильтрации смещает максимум проскока в сторону частиц с меньшим диаметром. Это хорошо согласуется с теоретическими представлениями о влиянии скорости фильтрации на диффузный и инерционный процессы осаждения частиц на поверхность пор. Наличие максимумов на кривых свидетельствует о возможном неблагоприятном сочетании параметров процесса фильтрования, свойств фильтроэлемента и примесей, при котором могут возникать условия максимального снижения эффективности процесса очистки.

Кроме рассмотренных механизмов оседания частиц на поверхность пор большое значение имеют такие процессы, как фильтрование частиц слоем осадка, образующегося на входной поверхности фильтроэлемента; процесс постепенного закупоривания пор слоем осадка и т. п. Эти процессы нестационарны во все время работы фильтроэлемента.

В фильтроэлементах из диэлектрических материалов на процессы фильтрования существенно влияет наличие зарядов на поверхности пор. Так, получившие широкое применение фильтры Петрянова из ультратонких перхлорвиниловых волокон (ФПП), как правило, несут на поверхности волокон заряды, и поэтому в начальной стадии процесса фильтрования на них достигается высокая эффективность очистки аэрозолей от примесей. Так, например, при фильтровании запыленного газа ($d_ч$=0,34 мкм) через свежий материал ФПП при скорости фильтрации 0,01 м/с достигается коэффициент проскока 0,0001%, а после снятия заряда в тех же условиях коэффициент проскока становится равным 10%.

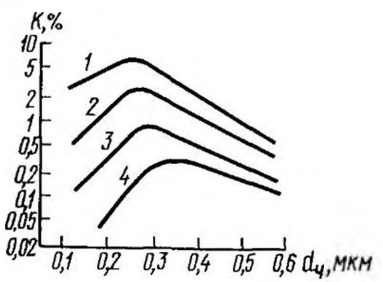

Рис. 23. Зависимость коэффициента проскока K от размеров частиц и скорости фильтрации $w_ф$, см/с:

1 — 0,94; 2 — 0,42; 3 — 0,21, 4 — 0,094

Все это существенно затрудняет теоретическое определение эффективности η очистки фильтроэлементов, на практике η обычно находят экспериментально.

Классификация фильтров основана на типе фильтровой перегородки, конструкции фильтра и его назначении, тонкости очистки и др.

По типу перегородки фильтры бывают: с зернистыми слоями (неподвижные свободно насыпанные зернистые материалы, псевдоожиженные слои); с гибкими пористыми перегородками (ткани, войлоки, волокнистые маты, губчатая резина, пенополиуретан и др.); с полужесткими пористыми перегородками (вязаные и тканые сетки, прессованные спирали и стружка и др.); с

жесткими пористыми перегородками (пористая керамика, пористые металлы и др).

Фильтрующие зернистые слои, состоящие из зерен различной формы, используют для очистки газов от крупных примесей. Для очистки газов от пылей механического происхождения (от дробилок, грохотов, сушилок, мельниц и др.) чаще используют фильтры из гравия. Такие фильтры дешевы, просты в эксплуатации и обеспечивают высокую эффективность очистки (до 0,99) газов от крупнодисперсной пыли.

Широко используют для изготовления фильтроэлементов различные ткани и войлоки из синтетических волокон, которые обладают высокой прочностью, повышенной тепловой и химической стойкостью. Основные свойства некоторых тканей для фильтрования приведены в табл. 34. Дальнейшее совершенствование синте-

Таблица 34

Ткань	Толщина, мм	Воздухопроницаемость при Δp=49 Па, м³/(м² мин)	Термостойкость, °С		Химическая стойкость в среде		
			при длительном воздействии	при кратковременном воздействии	кислота	щелочи	растворители
Сукно № 2	1,5	3	65—85	90—95	ОП	ОП	Х
Нитрон	1,6	7,5	120	150	Х—У	У	Х
Лавсан	1,4	4,0	130	160	Х	У—П	Х
Хлорин № 5231	1,32	7,6	65—70	80—90	ОХ	ОХ	У—Х
Стеклоткань ТССНФ	0,22	2,7	240	315	Х	У—П	ОХ

Примечание. ОХ — очень хорошая; У — удовлетворительная; П — плохая; ОП — очень плохая.

тических тканей для фильтрования направлено на повышение их термохимических и теплопрочностных свойств с целью использования в системах очистки горючих газов. Находят применение следующие синтетические фильтроткани: лавсановая ткань Л4 арт. 216, 217, 5468, 86013, 86033; стеклоткань ТСФТ-2-0 и ТСФТ-2-СГФ; нитрон арт. 133.

Для тонкой очистки газов от примесей часто применяют нетканый материал — волокнистый слой с хаотическим расположением волокон. Это войлоки, полученные на специальных иглопробивных машинах. Тонкость и эффективность очистки войлоков выше, чем у фильтрующих элементов из тканей, изготовленных из нитей того же диаметра. Используют. иглопробивное фильтровальное полотно «Фильтра-330» и «Фильтра-550» из лавсановых волокон; иглопробивное фильтровальное полотно «Фильтра-220» из лавсановых или поливинилхлоридных волокон; полотно нетка-

ное клеевое объемное фильтровальное марки ФРНК-ПГ из смеси (75% поливинилхлоридное и 25% лавсановое) волокон; полотно иглопробивное фильтровальное ФНИ-3 из смеси лавсановых (60%) и капроновых (40%) волокон и др.

Хорошими фильтрующими свойствами обладают хлопчатобумажные и шерстяные ткани: фильтровальное сукно № 2, техническое сукно ЦМ, байка с капроном (40%). Ткани из натуральных волокон повышенной стоимости часто заменяют тканями из синтетических волокон, поскольку последние более прочны и химически стойки.

Расчет фильтров сводится к определению площади фильтровальных элементов, гидравлического сопротивления фильтровального элемента и фильтра, продолжительности работы фильтра до регенерации фильтровальных элементов и мощности привода вентилятора. Исходными данными для расчета являются: объем газа Q, поступающего на очистку, м³/ч; допустимая удельная газовая нагрузка (скорость фильтрации), определяемая из условия достижения максимальной эффективности очистки газа и величины допустимого гидравлического сопротивления на фильтровальном элементе, м³/(м²·мин); входная концентрация пыли, мг/м³; дисперсность пыли, характеризуемая значением d_{50}, мкм, и среднеквадратичным отклонением σ, требуемая эффективность очистки газового потока от пыли

Поверхность F (м²) фильтрующего элемента определяется по формуле: $F=Q/(60q)$. Рекомендуемые значения удельной газовой нагрузки q зависят от многих факторов, в том числе от свойств улавливаемой пыли, структуры фильтровального материала, требуемой эффективности очистки и др. С достаточной для практических расчетов точностью удельную газовую нагрузку для рукавных фильтров определяют из следующего выражения [13]:

$$q = q_н c_1 c_2 c_3 c_4 c_5,$$

где $q_н$ — нормативная газовая нагрузка, зависящая от вида пыли, изменяется в пределах от 0,3 до 6 м³/(м²·мин): для пыли пескоструйных аппаратов — 2,6; для пыли пластмасс, металлических порошков — 1,7; для активированного угля, возгонов черных и цветных металлов — 1,2 м³/(м²·мин).

Коэффициент c_1, учитывающий особенности регенерации фильтровальных элементов, для регенерации фильтроэлементов из ткани импульсной продувкой сжатым газом равен 1; для рукавов из нетканых материалов 1,05—1,1.

Коэффициент c_2, учитывающий влияние входной концентрации пыли на удельную газовую нагрузку, определяют по следующим данным:

$c_{вх}$, г/м³	2	5	10	20	40	60	80	100
c_2	1,15	1,04	1	0,96	0,9	0,87	0,85	0,83

Коэффициент c_3, учитывающий влияние дисперсного состава пыли, определяют по данным [13], приведенным ниже:

d_{50}, мкм	<3	3—10	10—50	50—100	>100
c_3	0,7—0,9	0,9	1	1,1	1,2 1,4

Коэффициент c_4, учитывающий влияние температуры очищаемого газа, находят по данным [13], приведенным ниже:

t, °C . . .	20	40	60	80	100	120	140	160
c_4	1	0,9	0,84	0,78	0,73	0,72	0,72	0,7

Коэффициент c_5, учитывающий требования по эффективности очистки газа от пыли, при концентрации пыли в очищенном газе 30 мг/м³ равен 1, при концентрациях пыли, не превышающих 10 мг/м³, равен 0,95

Гидравлическое сопротивление фильтров Δp складывается из сопротивления фильтровальной перегородки Δp_1 и сопротивления корпуса фильтра Δp_2. Гидравлическое сопротивление фильтровальной перегородки зависит от структурного строения перегородки, ее толщины, режима фильтрования, от массы и свойств осевшей на перегородке пыли и характеризуется двумя составляющими. постоянной $\Delta p_1'$ и переменной $\Delta p_1''$. Таким образом,

$$\Delta p = \Delta p_1' + \Delta p_1'' + \Delta p_2.$$

Постоянную составляющую гидравлического сопротивления фильтровальной перегородки определяют [13] по формуле

$$\Delta p_1' = 10 k_п \mu (q/3600)^n,$$

где μ — вязкость воздуха, Па·с; n — показатель степени, зависящий от режима фильтрования, для ламинарного режима $n=1$; $k_п$ — коэффициент, характеризующий сопротивление фильтровальной перегородки после регенерации, м⁻¹. Для фильтровальных тканей из лавсана, улавливающих кварцевую пыль с $d_{50}=10$—20 мкм, $k_п=(1100—1500)\,10^6$, м⁻¹; возгоны сталеплавильных дуговых печей с $d_{50}=2{,}5—3$ мкм $k_п=(2300—2400)\,10^6$, м⁻¹ Для более плотных тканей (например, стеклоткани) на тех же пылях $k_п$ необходимо увеличивать в 1,2—1,3 раза. При улавливании тонкодисперсных пылей с $d_{50}<1$ мкм значение $k_п$ значительно возрастает и, например, для возгонов кремния с $d_{50}=0{,}6$ мкм, $k_п=(13\,000—15\,000)\,10^6$ м⁻¹.

Значение коэффициентов $k_м$ зависят от способа регенерации фильтровальной перегородки. Так, при обратной продувке в порах фильтрующего материала остается больше пыли, поэтому значения $k_п$, приведенные выше для регенерации импульсной продувкой, необходимо увеличивать на 15—25%.

Переменная составляющая гидравлического сопротивления фильтровальной перегородки определяется толщиной и структурой пылевого слоя, образующегося на перегородке, а также изменением порового пространства перегородки за счет забивания пор

частицами пыли. Этот процесс зависит от времени фильтрования и описывается зависимостью

$$\Delta p_1'' = 10 k_c \mu c_{вх} \tau (q/3600)^2, \qquad (11)$$

где k_c — параметр сопротивления слоя пыли, зависящий от медианного размера частиц, коэффициента сопротивления $\zeta_п$ слоя пыли и насыпной плотности $\rho_н$ слоя, $k_c = \zeta_п / (d^2_{50} \rho_н)$.

Значения параметра k_c обычно получают экспериментально [13]. Например, для очистки возгонов сталеплавильных печей с $d_{50} = 3$ мкм $k_c = 80 \cdot 10^9$ м/кг.

В тех случаях, когда экспериментальные данные отсутствуют, величину $\Delta p_1''$ рекомендуется принимать в пределах 250—350 Па для пыли с $d_{50} > 20$ мкм и в пределах 600—800 Па для более мелких пылей. Пользуясь формулой (11), по значению $\Delta p''_{1\,max}$ можно определить продолжительность фильтровального цикла до регенерации.

Гидравлическое сопротивление Δp_2 корпуса фильтра определяется суммой потерь давления, возникающих при движении потока воздуха в газоходах, местных сопротивлениях, дроссельных заслонках и т. п. Для расчета гидравлического сопротивления используют сведения из гидравлики. Существенное влияние на гидравлическое сопротивление элементов корпуса фильтра оказывает скорость движения газового потока. Для газоходов рекомендуется [11] скорость 13—15 м/с, при наличии грубой пыли с $d_{50} \geqslant 25$ мкм — 18—20 м/с, для очищенных газов в отводящих патрубках — 7—8 м/с.

Мощность электродвигателя вентилятора, необходимого для транспортирования газов через пылеулавливающий аппарат, определяют по формуле (5), при этом коэффициент запаса мощности принимается равным 1,1—1,15; КПД передачи мощности от электродвигателя к вентилятору, для клиноременной передачи 0,92—0,95; КПД вентилятора 0,65—0,8.

При использовании фильтровальных тканей и войлока в отечественных рукавных фильтрах обычно достигаются следующие параметры процесса фильтрования:

Входная концентрация пыли, г/м³	20—50
Гидравлическое сопротивление фильтра, кПа	1—3
Удельная газовая нагрузка, м³/(м²·мин), не более	0,3—1,6
Эффективность очистки	0,97—0,99
Пылеемкость фильтроэлементов, г/м²	1200—1300

Для ультратонкой очистки газов используют материалы типа ФП, представляющие собой нанесенные на марлевую подложку (или основу из скрепленных между собой более толстых волокон) слои синтетических волокон диаметром 1—2 мкм В качестве полимеров для ФП используют перхлорвинил (ФПП), фторполимеры (ФПФ) и др. Материалы ФП характеризуются высокими фильтрующими свойствами и малой толщиной (от 0,2 до 1 мм). Этот

материал рекомендуется применять для очистки агрессивных газов, заменяя при этом марлевую подложку на стойкую в данной среде. Чаще используют перхлорвиниловые волокна, характеризующиеся влагостойкостью и высокой химической стойкостью в кислотах, щелочах, растворах солей, органических растворителях. Однако термостойкость этих волокон невелика (60—70°С). Ацетатные волокна недостаточно стойки к влаге, кислотам, щелочам, но термостойкость их достигает 150°С. Пылеемкость материалов типа ФП составляет 50—100 г/м². Недостатком этих материалов является их низкая прочность.

Одним из распространенных фильтрующих материалов служат проволочные сетки, изготовленные из низкоуглеродистых или высоколегированных сталей, меди, латуни, бронзы, никеля и др. Сетки производят в соответствии с ГОСТ 3187—76* и ГОСТ 6613—86. Фильтрующие элементы, выполненные из сеток, могут работать в широком диапазоне температур от 0 до 800 К в агрессивных и неагрессивных средах. Тонкость очистки определяется размером ячейки сетки. Уменьшение размеров ячейки повышает тонкость очистки, но ведет к повышению ее гидравлического сопротивления. Тонкость очистки современными сетчатыми фильтрующими элементами достигает 15 мкм, однако при значительных перепадах давления на фильтре полотно сетки начинает деформироваться, ячейки теряют форму, что приводит к местному увеличению размеров проходных отверстий. Сетчатые фильтрующие элементы можно изготавливать многослойными Это несколько увеличивает тонкость и эффективность очистки, но приводит к росту гидравлического сопротивления фильтрующего элемента пропорционально количеству слоев сеток. Фильтрующие элементы из сеток, обладая некоторыми преимуществами по сравнению с фильтрующими элементами из тканей и войлока, уступают им по тонкости очистки.

Фильтрующие элементы из сеток С120 и С450, изготовленных из стали 12Х18Н10Т, используют в рукавных фильтрах типа ФРОС для очистки газов с температурой до 773 К. Входная концентрация пыли до 50 г/м³; гидравлическое сопротивление фильтра до 2,5 кПа, удельная газовая нагрузка 0,4—1 м³/(м²·мин).

Расчет гидравлического сопротивления фильтрующих элементов из сеток необходимо проводить по формуле (4), принимая значение коэффициента гидравлического сопротивления ζ по соотношению

$$\zeta = 72/\mathrm{Re} + 1{,}3,$$

где $\mathrm{Re} = w_{\text{н}}\rho_{\text{г}}d_{\text{п}}/\mu_{\text{г}}$ — число Рейнольдса; $\zeta = \frac{2\Delta p}{q\rho_{\text{г}}w_{\text{н}}^2}\frac{h}{d_{\text{п}}}$, h — толщина сетки; $d_{\text{п}}$ — размер ячеек сетки; q — параметр, равный 1,3 для фильтровых тканых сеток и 1,0 для сеток с квадратными ячейками.

Во всех технически развитых странах ведутся работы по созданию фильтрующих элементов из пористой керамики и пористых металлов различных типов. Пористым металлическим фильтрующим элементам свойственны достаточно высокая прочность и пластичность. В зависимости от марки применяемого материала можно обеспечить необходимую коррозионную стойкость, жаростойкость, окалиностойкость и теплопрочность. Металлические пористые фильтроэлементы хорошо сопротивляются резким колебаниям температур, они технологичны: свариваются, допускают пайку и механическую обработку на металлорежущих станках. Фильтрующие элементы из пористых металлов все больше применяют для очистки газов и жидкостей от примесей. Отечественная промышленность (Выксунский металлургический завод) выпускает опытные партии пористых металлов из сеток в соответствии с ТУ 14-1-3231—81, ТУ 14-1-4106—86, ТУ 14-1-4134—86.

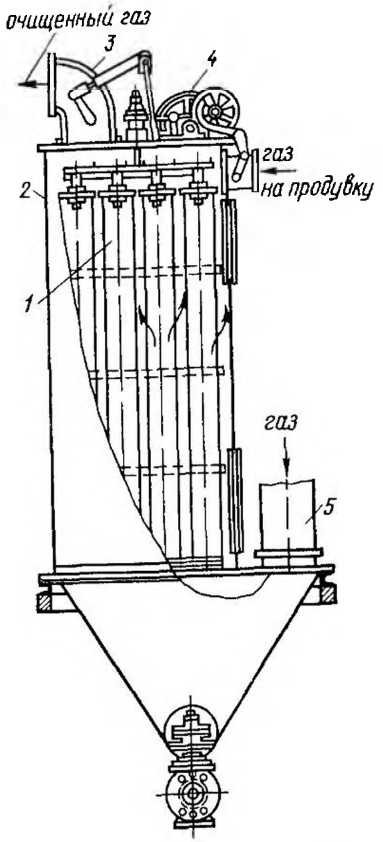

Рис 24 Рукавный фильтр

По конструктивному признаку газовые фильтры делят на рукавные, ячейковые (рамочные и каркасные) и рулонные.

Наибольшее распространение в промышленности для сухой очистки газовых выбросов от примесей имеют рукавные фильтры (рис. 24). В корпусе фильтра *2* устанавливается необходимое число рукавов *1*, во внутреннюю полость которых подается запыленный газ от входного патрубка *5*. Частицы загрязнений за счет ситового и других эффектов оседают в ворсе и образуют пылевой слой на внутренней поверхности рукавов. Очищенный воздух выходит из фильтра через патрубок *3*. При достижении максимально допустимого перепада давления на фильтре его отключают от системы и производят регенерацию встряхиванием рукавов с обработкой их продувкой сжатым газом. Регенерация осуществляется специальным устройством *4*. При очистке ткани удаляется значительная часть внешнего слоя пыли, но внутри ткани (между волокнами) остается достаточное количество пыли, что

обеспечивает высокую эффективность очистки газов в фильтре после его регенерации.

Для изготовления рукавов применяют различные ткани, войлоки и сетки. Производительность фильтра по газу зависит от числа рукавов, объединенных в общий корпус. В крупногабаритных фильтрах большой производительности число рукавов может достигать нескольких сотен штук.

Одним из условий нормальной работы рукавных фильтров является поддержание температуры очищаемых газов по газовому тракту фильтра в определенных пределах. Температура газа на входе в фильтр, с одной стороны, не должна превышать максимально допустимую для ткани температуру и, с другой стороны, быть выше температуры точки росы на 15—30°С. Промышленность выпускает серийно рукавные фильтры типа ФРО, ФР и др. [5].

Для очистки технологических сдувок и вентиляционного воздуха от радиоактивных аэрозолей применяют фильтры, снаряженные материалами ФП. Разработан ряд фильтров рамочной конструкции типа Д, Д-КЛ (см. табл. 37) и др.

Ячейковые фильтры имеют ограниченный срок службы из-за быстрого засорения ячеек фильтрующего элемента и образования слоя осадка на его входной части, что требует частой смены фильтрующих элементов или их периодической очистки от слоя осадка (регенерации). Этот недостаток частично устраняется при использовании рулонных фильтров, которые применяют для очистки воздуха с концентрацией примесей не более 10 мг/м^3. Для рулонных фильтров используют различные ткани, которые обычно не регенерируют.

Пылеуловители различных типов, в том числе и электрофильтры, применяют при повышенных концентрациях примесей в воздухе. Фильтры используют для тонкой очистки воздуха с концентрациями примесей не более 50 мг/м^3, если требуемая тонкая очистка воздуха идет при больших начальных концентрациях примесей, то очистку ведут в системе последовательно соединенных пылеуловителей и фильтров

Во всех системах ультратонкой очистки с фильтрами на основе материала ФП целесообразно применять предфильтры, которые должны полностью улавливать частицы крупнее 1 мкм и снижать концентрацию примесей до 0,5 мг/м^3. В предфильтрах в качестве материала обычно используют фильтрующие ткани и войлоки.

§ 14. МОКРЫЕ ПЫЛЕУЛОВИТЕЛИ

Аппараты мокрой очистки газов имеют широкое распространение, так как характеризуются высокой эффективностью очистки от мелкодисперсных пылей с $d_ч \geqslant (0{,}3—1{,}0)$ мкм, а также возмож-

ностью очистки от пыли горячих и взрывоопасных газов. Однако мокрые пылеуловители обладают рядом недостатков, ограничивающих область их применения: образование в процессе очистки шлама, что требует специальных систем для его переработки; вынос влаги в атмосферу и образование отложений в отводящих газоходах при охлаждении газов до температуры точки росы; необходимость создания оборотных систем подачи воды в пылеуловитель.

Аппараты мокрой очистки работают по принципу осаждения частиц пыли на поверхность либо капель жидкости, либо пленки жидкости. Осаждение частиц пыли на жидкость происходит под действием сил инерции и броуновского движения.

Силы инерции действуют на частицы пыли и капли жидкости при их сближении. Эти силы зависят от массы капель и частиц, а также от скорости их движения. Частицы пыли малого размера (менее 1 мкм) не обладают достаточной кинетической энергией и при сближении обычно огибают капли и не улавливаются жидкостью. Броуновское движение характерно для частиц малого размера. Для достижения высокой эффективности очистки газа от частиц примесей за счет броуновского движения необходимо уменьшить скорость движения газового потока в аппарате.

Кроме этих основных сил на процесс осаждения влияют: турбулентная диффузия, взаимодействие электрически заряженных частиц, процессы конденсации, испарения и др. Во всех случаях очистки газа в мокрых пылеуловителях важным фактором является смачиваемость частиц жидкостью (чем лучше смачиваемость, тем эффективнее процесс очистки)

Конструктивно мокрые пылеуловители разделяют на скрубберы Вентури, форсуночные и центробежные скрубберы, аппараты ударно инерционного типа, барботажно-пенные аппараты и др.

Среди аппаратов мокрой очистки с осаждением частиц пыли на поверхность капель на практике более применимы скрубберы Вентури (рис. 25). Основная часть скруббера — сопло Вентури *2*, в конфузорную часть которого подводится запыленный поток газа и через центробежные форсунки *1* жидкость на орошение. В конфузорной части сопла происходит разгон газа от входной скорости (w=15—20 м/с) до скорости в узком сечении сопла 30—200 м/с и более. Процесс осаждения частиц пыли на капли жидкости обусловлен массой жидкости, развитой поверхностью капель и высокой относительной скоростью частиц жидкости и пыли в конфузорной части сопла. Эффективность очистки в значительной степени зависит от равномерности распределения жидкости по сечению конфузорной части сопла. В диффузорной части сопла поток тормозится до скорости 15—20 м/с и подается в каплеуловитель *3*. Каплеуловитель обычно выполняют в виде прямоточного циклона.

Скрубберы Вентури обеспечивают высокую эффективность очистки аэрозолей со средним размером частиц 1—2 мкм при начальной концентрации примесей до 100 г/м³. Удельный расход воды на орошение при этом составляет 0,1—6,0 л/м³. Характерные размеры труб Вентури круглого сечения обычно составляют: $\alpha_1 = 15—28°$; $\alpha_2 = 6—8°$; $l_1 = (d_1 - d_2)/2 \operatorname{tg} \alpha_1/2$; $l_2 = 0{,}15 d_2$; $l_3 = (d_3 - d_2)/2 \operatorname{tg} \alpha_2/2$. Диаметры d_1, d_2 и d_3 рассчитывают для конкретных условий очистки воздуха от пыли. Круглые скрубберы Вентури применяют до расхода газа 80 000 м³/ч. При больших расходах газа и больших размерах трубы возможности равномерного распределения орошающей жидкости по сечению трубы ухудшаются, поэтому применяют несколько параллельно работающих круглых труб либо переходят на трубы прямоугольного сечения.

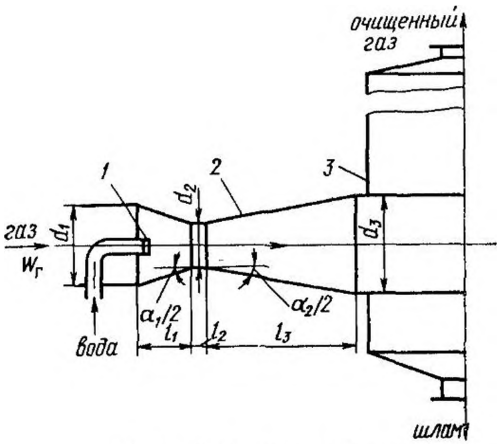

Рис. 25. Скруббер Вентури

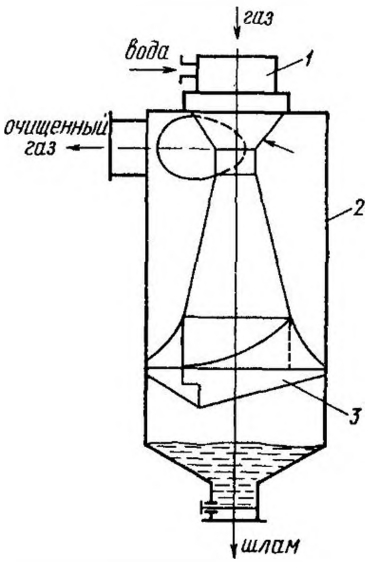

Рис. 26 Коагуляционно-центробежный мокрый пылеуловитель

Трубы Вентури типа ГВПВ (газопромыватель Вентури прямоточный, высоконапорный) предназначены для очистки запыленных технологических газов, поступающих с постоянным объемным расходом (см. табл 37). В качестве сепаратора капель в компоновке со скруббером Вентури применяют центробежные каплеуловители типа КЦТ [5, 17]. Конструктивно центробежный каплеуловитель типа КЦТ (см табл. 37) представляет собой малогабаритный прямоточный циклон с прямоугольным входным патрубком и рабочей частью высотой 1,5D, где D — диаметр циклона.

Одним из удачных конструктивных решений совместной компоновки скруббера Вентури и каплеуловителя может служить конструкция (рис. 26) коагуляционно-центробежного мокрого пылеуловителя (КЦМП). Сопло Вентури *1* установлено в корпусе циклона *2*, а для закручивания воздуха используется специальный закручиватель *3*. Промышленные КЦМП работают при скоростях в узком сечении трубы Вентури 40—70 м/с, удельных расходах воды на орошение 0,1—0,5 л/м³ и имеют габариты на 30% меньше, чем обычные скрубберы Вентури Эффективность очистки воздуха от кварцевой пыли в КЦМП составляет:

$d_ч$, мкм	1	5	10
η	0,70—0,90	0,90—0,98	0,94—0,99

Скрубберы Вентури широко используются в системах очистки газов от туманов. Эффективность очистки воздуха от тумана со средним размером частиц ~0,3 мкм достигает 0,999, что вполне сравнимо с высокоэффективными фильтрами.

При расчете скрубберов Вентури определяют гидравлическое сопротивление трубы Вентури

$$\Delta p = \Delta p_с + \Delta p_ж,$$

где $\Delta p_с$ — гидравлическое сопротивление сухой трубы, т. е без подачи жидкости на орошение ($\Delta p_с = \zeta_с w_г^2 \rho_г/2$, где $\zeta_с$ — коэффициент гидравлического сопротивления сухой трубы, $w_г$ — скорость газа в горловине, $\rho_г$ — плотность газа в горловине); $\Delta p_ж$ — гидравлическое сопротивление, обусловленное введением жидкости ($\Delta p_ж = \zeta_ж w_г^2 \rho_ж q_ж/2$, где $\zeta_ж$ — коэффициент гидравлического сопротивления трубы, обусловленный вводом жидкости; $\rho_ж$ — плотность жидкости, $q_ж$ — удельный расход жидкости на орошение, $\zeta_ж$ — определяют по экспериментальным формулам) для трубы Вентури круглого сечения при $l_1 = 0{,}15\ d_г$ $w_г = 60$—166 м/с и $q_ж = 0{,}4$—1,7 л/м³,

$$\zeta_ж/\zeta_с = 0{,}63\,[(m_ж/m_г)\,(\rho_г/\rho_ж)]^{-0{,}3},$$

где $m_г$ и $m_ж$ — массовые расходы жидкости и газа, г

Суммарное гидравлическое сопротивление трубы Вентури составляет 10-20 кПа

Эффективность очистки скруббера Вентури рассчитывают энергетическим методом по формуле

$$\eta = 1 - e^{-BE^n},$$

где B и n — константы, зависящие от физико-химических свойств и дисперсного состава пыли, которые определяют экспериментально

Примеси	B	n
Конверторная пыль	$9{,}88 \cdot 10^{-2}$	0,4663
Вагранoчная пыль	$1{,}355 \cdot 10^{-2}$	0,6210
Мартеновская пыль	$1{,}915 \cdot 10^{-2}$	0,5688
Туман фосфорной кислоты	$1{,}34 \cdot 10^{-2}$	0,6312

Суммарную энергию соприкосновения E определяют по формуле

$$E = \Delta p + p_ж Q_ж/Q_г,$$

где $p_ж$ — давление распыляемой жидкости на входе в пылеуловитель; $Q_ж$ и $Q_г$ — объемные расходы жидкости и газа соответственно.

Разновидностью аппаратов для улавливания пыли осаждением частиц на каплях жидкости являются форсуночные скрубберы (рис. 27, *а*). Запыленный газовый поток поступает в скруббер по патрубку *3* и направляется на зеркало воды, где осаждаются наиболее крупные частицы пыли. Газовый поток и мелкодисперсная пыль, распределяясь по всему сечению корпуса *1*, поднимаются вверх навстречу потоку капель, подаваемых в скруббер через форсуночные пояса *2*. Удельный расход воды в форсуночных скрубберах составляет 3,0—6,0 л/м³, гидравлическое сопротивление аппарата до 250 Па при скоростях движения потока газа в корпусе скруббера 0,7—1,5 м/с. Общая эффективность очистки, получаемая на форсуночных скрубберах, невысока и составляет, напри-

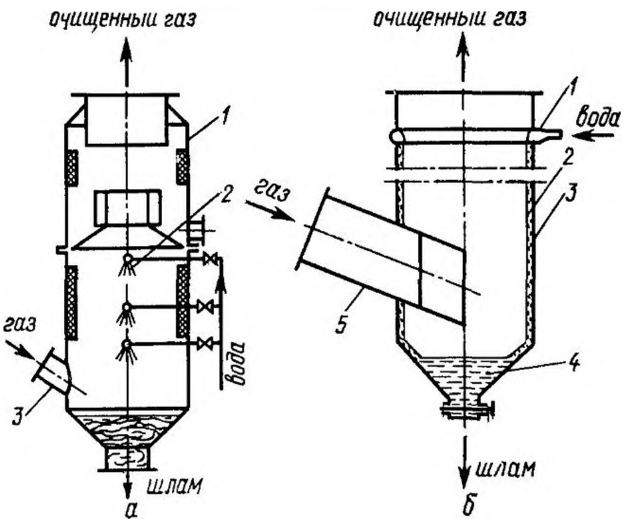

Рис. 27. Форсуночный (*а*) и центробежный (*б*) скрубберы

мер, 0,6—0,7 при очистке доменного газа. В форсуночных скрубберах эффективно улавливаются частицы размером >10 мкм. Одновременно с очисткой газ, проходящий через форсуночный скруббер, охлаждается и увлажняется до состояния насыщения.

В тех случаях, когда требуется очистка небольших масс горячих газов от загрязнений с размером частиц более 15—20 мкм, можно применять простейшие оросительные устройства, которые выполняются в виде ряда форсунок, встроенных в газоход. Удельный расход воды в таких системах выбирается равным от 0,1 до 0,3 л/м³. Скорость газового потока в газоходе в целях исключения интенсивного каплеуноса не должна превышать 3 м/с.

Для мокрой очистки нетоксичных и невзрывоопасных газов от пыли применяют центробежный скруббер СЦВБ-20 батарейного

типа [5]. Скруббер (рис. 28) компонуют из стандартных циклонных элементов *1*, представляющих собой трубу с завихрителем *2*. Орошение аппарата осуществляется водой с помощью форсунки *3*, установленной в камере неочищенного газа *4*. Перед камерой установлена сетка *5* для улавливания крупных частиц пыли. Циклонные элементы нижним концом входят в шламовую камеру *6*, а очищенный воздух выводится из аппарата через патрубок *7*. Технические характеристики СЦВБ-20 приведены в табл. 37.

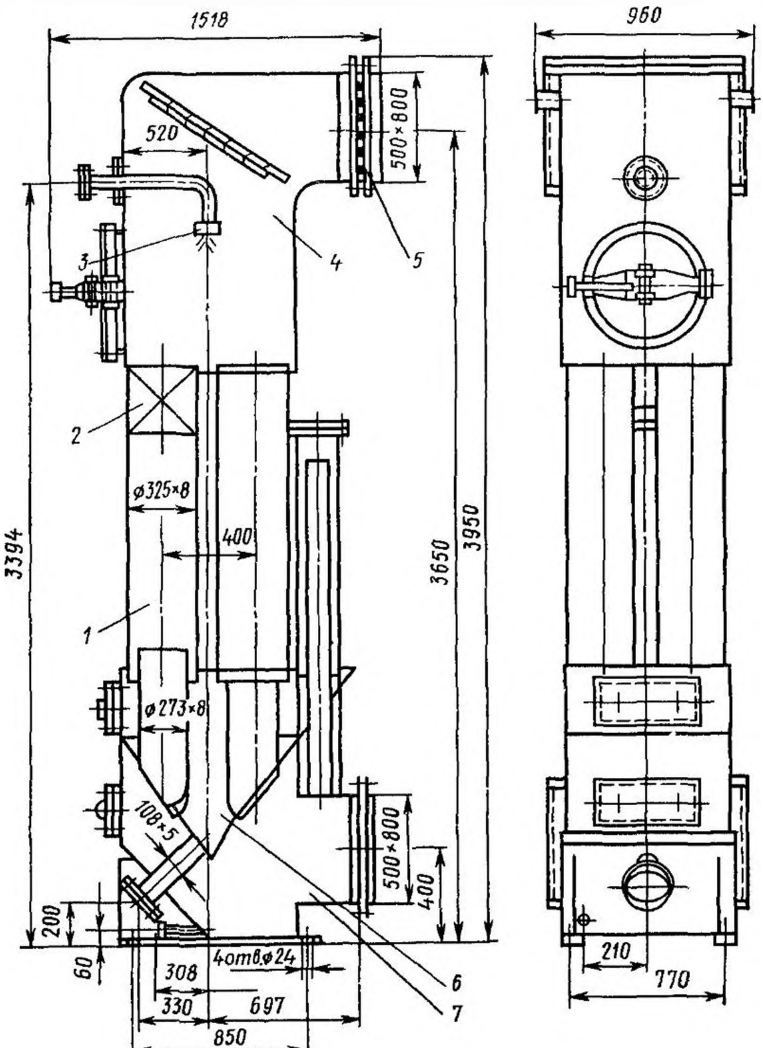

Рис. 28. Центробежный скруббер СЦВБ-20

В аппаратах центробежного типа (см. рис. 27, *б*) частицы пыли отбрасываются на пленку жидкости *2* центробежными силами, возникающими при вращении газового потока в аппарате за счет тангенциального расположения входного патрубка *5* в корпусе аппарата. Пленка жидкости толщиной не менее 0,3 мм создается подачей воды через сопла *1* и непрерывно стекает вниз, увлекая в бункер *4* частицы пыли. Эффективность очистки газа от пыли в аппаратах такого типа зависит главным образом от диаметра корпуса аппарата *3*, скорости газа во входном патрубке и дисперсности пыли. В табл. 35 приведены фракционные коэффициенты очистки центробежных скрубберов ЦС-ВТИ [30] диаметром 1 м. С ростом диаметра скруббера эффективность очистки падает.

Эффективность очистки возрастает при увеличении высоты корпуса до $H=(3—4)D$, после чего практически остается постоянной, поэтому обычно принимают $H=4D$. Гидравлическое сопротивление определяют по формуле (4), принимая $\zeta=33—46$. Удельный расход воды в центробежных скрубберах составляет 0,09—0,18 л/м³. Входная запыленность газового потока $\leqslant 20$ г/м³.

Аппараты ударно-инерционного типа работают по принципу осаждения частиц пыли на поверхности жидкости при повороте на 180° пыле-газового потока, движущегося со скоростью 25—50 м/с. Взвешенные в газе частицы за счет сил инерции после

Таблица 35

Скорость газов во входном патрубке, м/с	Фракционные коэффициенты очистки при скорости витания частиц*, см/с						
	0—0,5	0,5—2	2—5	5—10	10—15	15—20	>20
15,0	0,655	0,800	0,880	0,910	0,927	0,940	0,980
21,0	0,850	0,903	0,928	0,943	0,955	0,967	0,995

* Скорость витания зависит от размера и плотности частиц.

выхода из сопла не успевают за линиями тока и попадают на поверхность жидкости. Хорошо улавливаются частицы размером более 20 мкм. Основное преимущество аппаратов ударно-инерционного типа — малый удельный расход воды, который составляет не более 0,03 л/м³ и определяется только испарением и потерями жидкости со шламом. Эффективность очистки газа в таких аппаратах весьма чувствительна к изменению расстояния между срезом сопла и зеркалом жидкости.

К мокрым пылеуловителям относят барботажно-пенные пылеуловители с провальной (рис. 29, *а*) и переливной решетками (рис.

29, *б*). В таких аппаратах газ на очистку поступает под решетку *3*, проходит через отверстия в решетке и, барботируя через слой жидкости и пены *2*, очищается от части пыли за счет осаждения частиц на внутренней поверхности газовых пузырей. Режим работы аппаратов зависит от скорости подачи воздуха под решетку. При скорости до 1 м/с наблюдается барботажный режим работы аппарата. Дальнейший рост скорости газа в корпусе *1* аппарата до 2—2,5 м/с сопровождается возникновением пенного слоя над жидкостью, что приводит к повышению эффективности очистки га-

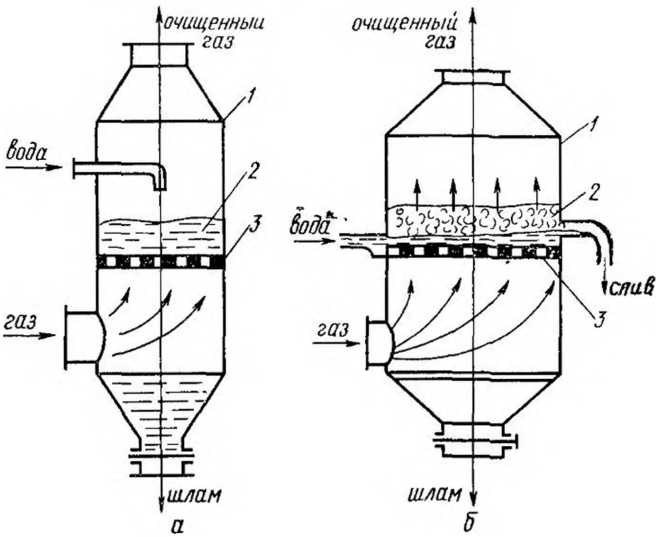

Рис. 29. Барботажно-пенный пылеуловитель с провальной (*а*) и переливной (*б*) решетками

за и брызгоуноса из аппарата. Современные барботажно-пенные аппараты обеспечивают эффективность очистки газа от мелкодисперсной пыли ~0,95—0,96 при удельных расходах воды 0,4—0,5 л/м³. Практика эксплуатации барботажно-пенных аппаратов показывает, что они весьма чувствительны к неравномерности подачи газа под провальные решетки. Неравномерная подача газа приводит к местному сдуву пленки жидкости с решетки. Кроме того, решетки аппаратов склонны к засорению.

§ 15. ТУМАНОУЛОВИТЕЛИ

Для очистки воздуха от туманов кислот, щелочей, масел и других жидкостей используют волокнистые фильтры, принцип действия которых основан на осаждении капель на поверхности пор с последующим стеканием жидкости под действием сил тя-

жести. Осаждение капель жидкости происходит под действием всех ранее рассмотренных механизмов отделения частиц загрязнителя от газовой фазы на фильтроэлементах.

Туманоуловители делят на низкоскоростные ($w_ф \leqslant 0{,}15$ м/с), в которых преобладает механизм диффузионного осаждения капель, и высокоскоростные ($w_ф = 2—2{,}5$ м/с), где осаждение происходит главным образом под воздействием инерционных сил.

Фильтрующий элемент низкоскоростного туманоуловителя показан на рис 30 В пространство между двумя цилиндрами *3*, изготовленными из сеток, помещается волокнистый фильтроэлемент *4*, который крепится через фланец *2* к корпусу туманоуловителя *1*. Жидкость, осевшая на фильтре элемента, стекает на нижний фланец *5* и затем через трубку гидрозатвора *6* и стакан *7* сливается из фильтра. Волокнистые низкоскоростные туманоуловители обеспечивают высокую эффективность очистки (до 0,999) газа от частиц размером менее 3 мкм и полностью улавливают частицы большего размера. Волокнистые слои формируются набивкой стекловолокна диаметром от 7 до 30 мкм или полимерных волокон (лавсан, полипропилен) диаметром от 12 до 40 мкм. Толщина слоя составляет 5—15 см. Гидравлическое сопротивление сухих фильтроэлементов равно 200—1000 Па.

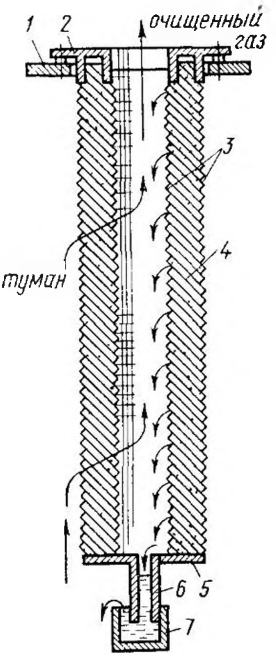

Рис 30 Фильтрующий элемент низкоскоростного туманоуловителя

Высокоскоростные туманоуловители имеют меньшие габаритные размеры и обеспечивают эффективность очистки, равную 0,90—0,98 при $\Delta p = 1500—2000$ Па, от тумана с частицами менее 3 мкм. В качестве фильтрующей набивки в таких туманоуловителях используют войлоки из полипропиленовых волокон, которые успешно работают в среде разбавленных и концентрированных кислот (H_2SO_4, HCl, HF, H_3PO_4, HNO_3) и сильных щелочей.

В тех случаях, когда диаметр капель тумана составляет 0,6—0,7 мкм и менее, для достижения приемлемой эффективности очистки приходится увеличивать скорость фильтрации до 4,5—5 м/с, что приводит к заметному брызгоуносу с выходной стороны фильтроэлемента (брызгоунос обычно возникает уже при скоростях 1,7—2,5 м/с). Значительно уменьшить брызгоунос можно применением брызгоуловителей в конструкции туманоуловителя.

Для улавливания жидких частиц размером более 5 мкм при-

меняют брызгоуловители из пакетов сеток, где захват частиц жидкости происходит за счет эффекта касания и инерционных сил Скорость фильтрации в брызгоуловителях не должна превышать 6 м/с.

На рис. 31 показана конструкция высокоскоростного волокнистого туманоуловителя с цилиндрическим фильтрующим элементом *3*, который представляет собой перфорированный барабан с глухой крышкой. В барабане установлен грубоволокнистый войлок *2* толщиной 3—5 мм Вокруг барабана по его внешней стороне расположен брызгоуловитель *1*, представляющий собой набор перфорированных плоских и гофрированных слоев винипластовых лент. Брызгоуловитель и фильтроэлемент нижней частью установлены в слой жидкости.

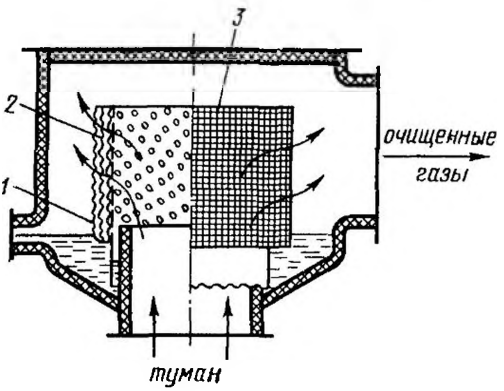

Рис. 31. Высокоскоростной туманоуловитель

Для очистки аспирационного воздуха ванн хромирования, содержащего туман и брызги хромовой и серной кислот, применяют волокнистые фильтры типа ФВГ-Т [5]. В корпусе размещена кассета с фильтрующим материалом — иглопробивным войлоком (ТУ 17-14-77—79), состоящим из волокон диаметром 70 мкм, толщиной слоя 4—5 мм. Технические характеристики ФВГ-Т приведены в табл. 37.

Расчет туманоуловителей. Наибольший эффект отделения капель тумана от газа достигается на двухступенчатых туманоуловителях. Первая ступень, состоящая из тонких волокон, обычно работает при скорости фильтрации 0,05—0,2 м/с (низкоскоростные туманоуловители) или при скорости 2—2,5 м/с (высокоскоростные туманоуловители). Вторая ступень — сетчатый брызгоуловитель — для улавливания укрупненных жидких частиц.

Расчет туманоуловителей из волокнистых фильтровальных материалов обычно сводится к определению площади фильтрации по известному расходу загрязненного воздуха и рекомендуемой для выбранного материала скорости фильтрации. Приведем значения скоростей фильтрации некоторых фильтровальных материалов, применяемых в низкоскоростных туманоуловителях: иглопробивной войлок из волокон диаметром 65—70 мкм, 0,2 м/с; иглопробивной войлок из лавсановых волокон МЧПС диаметром 18—20 мкм, 0,1—0,15 м/с.

Площадь фильтрации определяют по формуле $F = Q/w_ф$, где $w_ф$ — скорость фильтрации. При расчете сеточных брызгоуловителей оптимальную скорость фильтрации определяют по формуле

$$w_ф = 0,107\sqrt{(\rho_ж - \rho_в)/\rho_в},$$

где $\rho_ж$, $\rho_в$ — соответственно плотность жидкости и воздуха. Для масел $\rho_ж \approx 900$ кг/м³, поэтому $w_ф \approx 2,8$ м/с.

Эффективность очистки от капель в сеточном пакете рассчитывают по формуле

$$\eta = 1 - \left(1 - 0,2\frac{hS_{уд}}{N}\eta'\right)^N,$$

где h — толщина пакета, м; $S_{уд}$ — удельная поверхность проволоки в пакете сеток, м²/м³; N — число сеток в пакете, шт.; η' — эффективность очистки воздуха от капель определенного размера (фракционная очистка) одной сеткой.

Толщину пакета сеток выбирают в пределах 100—200 мм, а удельную поверхность проволоки в пакете сетки вычисляют по формуле

$$S_{уд} = 4(1 - П)/d_{пр},$$

где П — пористость пакета сеток, выбираемая в пределах 0,85—0,95; $d_{пр}$ — диаметр проволоки сетки, обычно $d_{пр} = (100 - 200)\,10^{-6}$ м.

Фракционная очистка η' одной сеткой зависит от режима фильтрования, свойств фильтруемой среды, размера фракции, характеристик сетки. Ее значение для условий фильтрования при атмосферном давлении удобно определять графически (рис. 32). Для этого необходимо предварительно вычислить величину критерия Стокса по формуле

$$St = \rho_ж w_ф d_ч^2 k_к / 18\mu d_{пр},$$

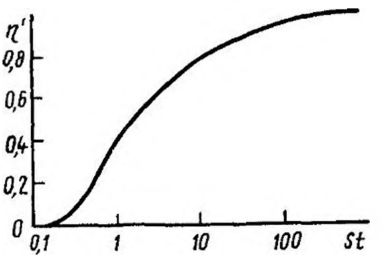

Рис. 32. Зависимость фракционной эффективности очистки η' от критерия Стокса

где $d_ч$ — диаметр, капель, м. Суммарную эффективность очистки определяют по формуле

$$\eta = \sum_1^n \phi_i \eta_i,$$

где ϕ_i — фракционная доля i-й фракции; η_i — эффективность очистки тумана от капель диаметром $d_{ч,i}$.

В табл. 36 приведены сравнительные характеристики туманоуловителей различных типов.

Мощность двигателя вентилятора, необходимого для транспортирования тумана через аппарат очистки, вычисляют по значениям Q и Δp, при этом гидравлическое сопротивление аппарата можно принимать по рекомендациям табл. 36 или рассчитывать по формулам, см. [30].

Таблица 36

Тип туманоуловителя	Скорость фильтрации, м/с	Гидравлическое сопротивление, кПа	Эффективность очистки частиц размером, мм		
			до 1	1—3	3—10
Низкоскоростные	0,01—0,1	0,5—5	0,92—0,99	0,96—1	1
Высокоскоростные	1—10	1,5—8	0,50—0,85	0,85—0,97	0,95—1
Сетчатые пакеты	2,5—4,5	0,2—1	0,20—0,40	0,70—0,90	0,90—0,98

Пылеуловители и туманоуловители, рекомендуемые для очистки вентиляционных и технологических выбросов машиностроительных и приборостроительных предприятий в атмосферу, приведены в табл. 37.

§ 16. ОЧИСТКА ВЫБРОСОВ ОТ ГАЗО- И ПАРООБРАЗНЫХ ЗАГРЯЗНИТЕЛЕЙ

Процессы очистки и обезвреживания технологических и вентиляционных выбросов машиностроительных предприятий от газо- и парообразных примесей характеризуются тем, что, во-первых, газы, выбрасываемые в атмосферу, весьма разнообразны по химическому составу; во-вторых, они имеют подчас достаточно высокую температуру и содержат большое количество пыли, что существенно затрудняет процесс газоочистки и требует предварительной подготовки отходящих газов; в-третьих, концентрация газообразных и парообразных примесей чаще в вентиляционных и реже в технологических выбросах обычно переменна и низка.

Создаваемые в промышленности газоочистные установки позволяют обезвреживать технологические и вентиляционные выбросы без или с последующей утилизацией уловленных примесей. Первый тип аппаратов характеризуется санитарными ограничениями, связанными с процессами удаления, транспортировки и захоронения уловленного продукта. Аппараты с выделением продукта в концентрированном виде и дальнейшем использовании его для нужд народного хозяйства наиболее перспективны. Производство таких установок — важный этап в разработке малоотходной и безотходной технологии.

Таблица 37

Вид пыле- или туманоуловителя	Класс пылеуловителя	Группа пыли по ГОСТ 12.2.043—80	Параметры пыле или туманоуловителя					Область применения
			допустимая входная концентрация пыли, г/м³	гидравлическое сопротивление, кПа	производительность по газу, тыс. м³/ч	эффективность очистки	наибольшая температура газов, °С	
Циклоны: ЦН-15, ЦН-24, ЦН-11	V	I, II	1000 (слабослипающиеся пыли) 250 (среднеслипающиеся пыли)	Не более 0,5	0,612—48	0,8 при $d_{50}=20$ мкм	400	Сухая очистка от пыли невзрывоопасных газов, кроме сильнослипающихся пылей. Очистка выбросов деревообрабатывающих и механических цехов, сушилок, печей и т. д.
ЦП-2	V	I, II	1500	Не более 0,4	38—230	0,86—0,9	250	Сухая очистка от пыли взрывоопасных газов (дымовые газы парогенераторов и т. п.)
СК-ЦН-34	IV	II, III	1000	4	2,54—92	0,95	250	Очистка газов от сажи
Батарейные циклоны БЦ-2	V	I, II	75 (слабослипающаяся пыль) 35 (среднеслипающаяся пыль)	0,45—0,6	15—49	0,85 при $d_{50}=20$ мкм	400	Очистка дымовых газов от золы, улавливание волокнистой и неслипающейся пыли
Электрофильтры: УГМ	II	I—V	60	4	36—950	До 0,999	250	Тонкая очистка технологических выбросов от пыли

Продолжение табл. 37

Вид пыле- или туманоуловителя	Класс пылеуловителя	Группа пыли по ГОСТ 12.2.043—80	Параметры пыле- или туманоуловителя					Область применения
			допустимая входная концентрация пыли, г/м³	гидравлическое сопротивление, кПа	производительность по газу, тыс. м³/ч	эффективность очистки	наибольшая температура газов, °С	
С	II	I—V	3	5	18—36	До 0,99	60	Тонкая очистка от аэрозолей смолы генераторных газов
УУП	II	IV, V	—	0,04	5—30	0,95	80	Тонкая очистка вентиляционных выбросов от пыли, туманов масел, пластификатов и т. п.
ФЭ	II	IV, V	0,01	0,03—0,05	1	0,95	20	Очистка вентиляционного воздуха от пыли
Рукавные фильтры ФРО	II	III, IV	20	2—3	До 50	0,98	130 (рукав из лавсана) 230 (рукав из стеклоткани)	Очистка сухих газов от слабослипающихся пылей
Фильтры: Д, Д-КЛ	I	IV, V	0,0005	0,4—0,6	До 3,5	0,999	60	Ультратонкая очистка вентиляционных выбросов от радиоактивных, биологических и высокотоксичных пылей
ФАРТОС	I	IV, V	—	0,5	0,500	0,999	100	Ультратонкая очистка технологических сдувок от радиоактивных пылей

Вид пыле- или туманоуловителя	Класс пылеуловителя	Группа пыли по ГОСТ 12.2 043—80	Параметры пыле- или туманоуловителя					Область применения
			допустимая входная концентрация пыли, г/м³	гидравлическое сопротивление, кПа	производительность по газу, тыс. м³/ч	эффективность очистки	наибольшая температура газов, °С	
Скрубберы Вентури ГВПВ	II	—	30	6—12	1,7—84	0,96—0,98	400	Высокоэффективная очистка газов от пылей любого дисперсного состава
Сепаратор капель КЦТ	V	—	Не более 1000	0,35	1,7—84	Концентрация влаги в газе на выходе не более 70 мг/м³	400	Улавливание капель после скруббера Вентури
Центробежный скруббер СЦВБ-20	II	II—V	Не более 10	1,7	20	0,98 для частиц размером 10 мкм	60	Мокрая очистка нетоксичных и невзрывоопасных пылей
Волокнистый фильтр ФВГ-Т	II	—	—	0,15—0,5	3,5—80	0,96—0,99	90	Тонкая очистка аспирационного воздуха ванн хромирования от тумана и брызг

Методы очистки промышленных выбросов от газообразных загрязнителей по характеру протекания физико-химических процессов делят на пять основных групп промывка выбросов растворителями примесей (абсорбция); промывка выбросов растворами реагентов, связывающих примеси химически (хемосорбция); поглощение газообразных примесей твердыми активными веществами (адсорбция); термическая нейтрализация отходящих газов и поглощение примесей путем применения каталитического превращения.

Метод абсорбции. В технике очистки газовых выбросов процесс абсорбции часто называют *скрубберным* процессом. Очистка газовых выбросов методом абсорбции заключается в разделении газовоздушной смеси на составные части путем поглощения одного или нескольких газовых компонентов (абсорбатов) этой смеси жидким поглотителем (абсорбентом) с образованием раствора.

Движущей силой здесь является градиент концентрации на границе фаз газ — жидкость. Растворенный в жидкости компонент газовоздушной смеси (абсорбат) благодаря диффузии проникает во внутренние слои абсорбента. Процесс протекает тем быстрее, чем больше поверхность раздела фаз, турбулентность потоков и коэффициенты диффузии, т. е. в процессе проектирования абсорберов особое внимание следует уделять организации контакта газового потока с жидким растворителем и выбору поглощающей жидкости (абсорбента).

Решающим условием при выборе абсорбента является растворимость в нем извлекаемого компонента и ее зависимость от температуры и давления. Если растворимость газов при 0°С и парциальном давлении 101,3 кПа составляет сотни граммов на 1 кг растворителя, то такие газы называют хорошо растворимыми.

Для удаления из технологических выбросов таких газов, как аммиак, хлористый или фтористый водород, целесообразно применять в качестве поглотительной жидкости воду, так как растворимость их в воде составляет сотни граммов на 1 кг H_2O. При поглощении же из газов сернистого ангидрида или хлора расход воды будет значительным, так как растворимость их составляет сотые доли грамма на 1 кг воды. В некоторых специальных случаях вместо воды применяют водные растворы таких химических веществ, как сернистая кислота (для улавливания водяных паров), вязкие масла (для улавливания ароматических углеводородов из коксового газа) и др.

Организация контакта газового потока с жидким растворителем осуществляется либо пропусканием газа через насадочную колонну, либо распылением жидкости, либо барботажем газа через слой абсорбирующей жидкости В зависимости от реализуемого способа контакта газ — жидкость различают: насадочные башни: форсуночные и центробежные скрубберы (см. рис. 27).

скрубберы Вентури (см. рис. 25); барботажно-пенные (см. рис. 29), тарельчатые и другие скрубберы.

Общее устройство противопоточной насадочной башни приведено на рис. 33. Загрязненный газ входит в нижнюю часть башни, а очищенный покидает ее через верхнюю часть, куда при помощи одного или нескольких разбрызгивателей *2* вводят чистый поглотитель, а из нижней отбирают отработанный раствор. Очищенный газ обычно сбрасывают в атмосферу. Жидкость, покидающую абсорбер, подвергают регенерации, десорбируя загрязняющее вещество, и возвращают в процесс или выводят в качестве отхода (побочного продукта). Химически инертная насадка *1*, заполняющая внутреннюю полость колонны, предназначена для увеличения поверхности жидкости, растекающейся по ней в виде пленки. В качестве насадки используют тела разной геометрической формы, каждая из которых характеризуется собственной удельной поверхностью и сопротивлением движению газового потока. Типичные формы насадок показаны на рис. 34. Материалы для изготовления насадок (керамика, фарфор, пластмассы, металлы) выбираются исходя из соображений антикоррозионной устойчивости.

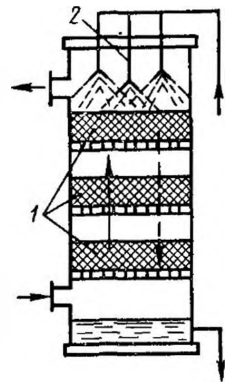

Рис 33. Орошаемая противопоточная насадочная башня

Большое распространение получили башни с колпачковыми тарелками. На рис. 35 изображена схема устройства тарельчатого абсорбера, в котором вместо насадки установлено несколько тарелок *1*. Каждая тарелка снабжена колпачками *2* с зубчатыми краями, патрубками *3* и переливными трубками *4*. Абсорбент в этих аппаратах стекает от тарелки к тарелке по переливным вертикальным трубкам. Очищаемый газ движется снизу вверх в направлении, указанном стрелками, барботируя через слой жидкости. При прохождении между зубцами колпачков газ разбивается на множество струек и пузырьков, в результате чего образуется большая поверхность соприкосновения взаимодействующих веществ. Иногда вместо колпачковых тарелок применяют перфорированные пластины с большим количеством мелких отверстий (диаметр

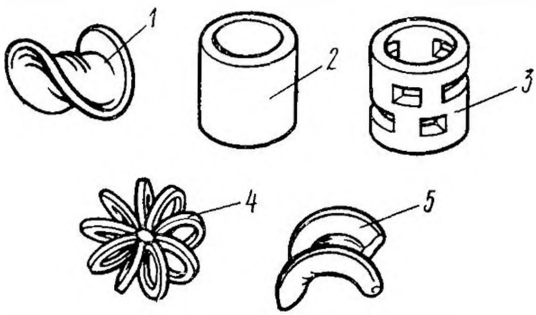

Рис 34 Формы стандартных элементов насадки:
1 — седло Берля, *2* — кольцо Рашига, *3* — кольцо Палля, *4* — розетка Теллера; *5* — седло «Интелокс»

~6 мм), которые создают пузырьки газа одинаковой формы и размера. Более мелкие отверстия затрудняют стекание промывной жидкости особенно при значительных расходах газа.

Применение абсорбированных методов очистки, как правило, связано с использованием схем, включающих узлы абсорбции и десорбции. Десорбцию растворенного газа (или регенерация растворителя) проводят либо снижением общего давления (или парциального давления) примеси, либо повышением температуры, либо использованием обоих приемов одновременно.

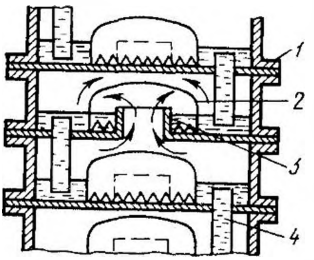

Рис. 35. Схема колпачково-тарельчатого абсорбера

Расчет абсорбера состоит в определении объемного расхода поглотительной жидкости $Q_а$, необходимой поверхности F соприкосновения газа с жидкостью и параметров вспомогательной аппаратуры (мощность насосов, размер баков и т. п.).

Объемный расход поглотительной жидкости рассчитывают из уравнения материального баланса процесса абсорбции — масса поглощаемого компонента m, которая удалена из очищаемого газа, должна быть равна массе этого компонента, которая перешла в жидкость:

$$m = Q_г (y_1 - y_2) = Q_а (x_2 - x_1),$$

где $Q_г$ — объемный расход очищаемого газа, м³/с; x_1 и x_2 — начальная и конечная концентрации газового компонента и поглотительной жидкости, г/м³; y_1 и y_2 — начальная и конечная концентрации поглощаемого газообразного компонента в очищаемом газе, г/м³.

Необходимую поверхность соприкосновения газа с жидкостью находят по формуле

$$F = 10^3 m/(k_а \Delta p_{ср}),$$

где $k_а$ — коэффициент абсорбции (коэффициент массопередачи), кг/(м²·ч·Па); $\Delta p_{ср}$ — средняя движущая сила абсорбции, Па.

Коэффициент абсорбции характеризует скорость растворения газового компонента в жидкости и определяется общим сопротивлением диффузии этого компонента через газовую и жидкостную пленки. Для хорошо растворимых газов значение коэффициента абсорбции можно определить по формуле, предложенной И. Л. Пейсаховым:

$$k_а = \frac{53{,}7 \cdot 10^6 M w^{0,75} (0{,}0011T - 0{,}18)^{0,25}}{(13{,}7 + \sqrt{w})\, d_{экв}^{0,25}},$$

где M — молярная масса поглощаемого компонента, кг; w — скорость газа в свободном сечении скруббера, м/с; T — абсолютная

температура газа, К; $d_{экв}$ — эквивалентный диаметр насадки, равный учетверенному значению живого сечения насадки, деленного на ее удельную поверхность, м.

Движущая сила абсорбции равна разности парциальных давлений поглощаемого компонента в газовой фазе и равновесного парциального давления этого компонента над поглотительной жидкостью. Для подсчета средней движущей силы абсорбции следует найти среднеарифметическое значение движущей силы абсорбции исходя из ее значения на входе и выходе из аппарата. Если эти значения отличаются более чем в два раза, то $\Delta p_{ср}$ следует подсчитывать как среднюю логарифмическую величину:

$$\Delta p_{ср} = \frac{(p_г' - p_ж') - (p_г'' - p_ж'')}{\ln\left[(p_г' - p_ж')/(p_г'' - p_ж'')\right]},$$

где $p_г'$ и $p_г''$ — соответственно парциальное давление поглощаемого компонента в газовой фазе на входе и выходе из аппарата; $p_ж'$ и $p_ж''$ — соответственно парциальное равновесное давление поглощаемого компонента над жидкостью на входе и выходе из аппарата.

Следует иметь в виду, что при противотоке (газ и жидкость движутся навстречу друг другу) значение $\Delta p_{ср}$ больше, чем при прямотоке (газ и жидкость движутся в одну сторону). Следовательно, противоток выгоднее, так как для его осуществления требуется аппаратура меньшего размера. Прямоток целесообразно применять, когда равновесное давление поглощаемого компонента над жидкостью очень невелико и почти не увеличивается по мере растворения газового компонента. Обычно это осуществляется в тех случаях, когда растворяемый компонент газа вступает в реакции с жидкостью или ее компонентами (хемосорбция). Прямоток особенно неэффективен для плохо растворимых газов.

Метод хемосорбции. Основан на поглощении газов и паров твердыми или жидкими поглотителями с образованием малолетучих или малорастворимых химических соединений. Поглотительная способность хемосорбента почти не зависит от давления, поэтому хемосорбция более выгодна при небольшой концентрации вредностей в отходящих газах. Большинство реакций, протекающих в процессе хемосорбции, являются экзотермическими и обратимыми, поэтому при повышении температуры раствора образующееся химическое соединение разлагается с выделением исходных элементов. На этом принципе основан механизм десорбции хемосорбента.

Примером хемосорбции может служить очистка газовоздушной смеси от сероводорода с применением мышьяковощелочного, этаноламинового и других растворов. При мышьяковощелочном методе извлекаемый из отходящего газа сереводород связывается оксисульфомышьяковой солью, находящейся в водном растворе:

$$Na_4As_2S_5O_2 + H_2S = Na_4As_2S_6O + H_2O$$

Регенерацию раствора производят окислением кислорода, содержащегося в очищаемом воздухе:

$$Na_4As_2S_6O + {}^1/_2O_2 = Na_4As_2S_5O_2 + S_2$$

В этом случае в качестве побочного продукта получается сера.

Основным видом аппаратуры для реализации процессов хемосорбции служат насадочные башни, пенные и барботажные скрубберы, распылительные аппараты типа труб Вентури и аппараты с различными механическими распылителями. В промышленности распространены аппараты с подвижной насадкой, к достоинствам которых относятся высокая эффективность разделения при умеренном гидравлическом сопротивлении, а также большая пропускная способность по газу.

На рис. 36 показана принципиальная схема скруббера с подвижной насадкой. В верхней части аппарата установлен оросиитель *1*, а под ним размещены верхняя *2* и нижняя опорная *5* ограничительные решетки, между которыми находится подвижная насадка. К опорной решетке меньшим основанием прикреплен расширяющийся усеченный кольцевой элемент *4*, делящий пространство опорной решетки на кольцевую *3* и центральную *6* зоны. В качестве насадочных тел используют полые, сплошные и перфорированные шары, а также кольца, полукольца, кубики, скрещенные сплошные и перфорированные диски.

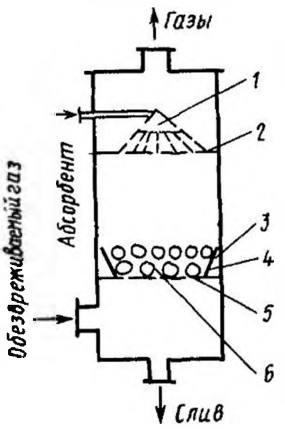

Рис. 36. Скруббер с подвижной насадкой

Обрабатываемый газ подается в аппарат под опорную решетку и делится на два потока: центральный и кольцевой. При прохождении кольцевой зоны поток газа сужается, увеличивает скорость движения, вступает в контакт с прижимаемыми к стенке элементами подвижной насадки и перемещает их от стенки в центральный поток. Насадка совершает пульсационное движение в центральном и прилегающем к стенке аппарата потоках, турбулизирует взаимодействующие фазы и обеспечивает высокую эффективность обработки газа жидкостью. В тех случаях, когда в результате процесса выпадает осадок, подвижная насадка удаляет его со стенок корпуса аппарата или опорной решетки.

Хемосорбция — один из распространенных способов очистки отходящих газов от оксидов азота. На Синарском трубном заводе (г. Каменск-Уральский) работает установка очистки газов от оксидов азота, выделяющихся из ванн травления, с помощью из-

вестковаго раствора. Установка состоит из четырех параллельно работающих автономных линий газоочистки, одна из которых является резервной. В состав каждой линии входит скруббер Вентури с форсуночным орошением газов раствором извести. Газы травильных ванн, содержащие оксиды азота, пары серной, соляной и плавиковой кислот, отсасываются из общего борова вентиляторами и направляются в скрубберы, где они контактируют с раствором извести, и нейтрализуются. Очищенный газ поступает в центробежный каплеуловитель и выбрасывается в атмосферу. Эффективность очистки от оксидов азота составляет 0,17—0,86 и от паров кислот — 0,95. Стоимость приведенных затрат на очистку 1000 м³ газа составляет 3,5 коп.

Методы абсорбции и хемосорбции, применяемые для очистки промышленных выбросов, называют мокрыми. Преимущество абсорбционных методов заключается в экономичности очистки большого количества газов и осуществлении непрерывных технологических процессов. Эффективность мокрой очистки газов, отходящих от гальванических ванн с помощью щелевого скруббера ПВМ при обезвреживании их 2—3%-ным водным раствором едкой щелочи, составляет по хлороводороду 0,85—0,92 и по оксидам азота (NO_2) 0,65. При использовании в качестве поглотительной жидкости воды эффективность очистки по HCl снижается до 0,75.

Основной недостаток мокрых методов состоит в том, что перед очисткой и после ее осуществления сильно понижается температура газов, что приводит в конечном итоге к снижению эффективности рассеивания остаточных газов в атмосфере. Кроме того, оборудование мокрых методов очистки громоздко и требует создания системы жидкостного орошения. В процессе работы абсорбционных аппаратов образуется большое количество отходов, представляющих смесь пыли, растворителя и продуктов поглощения. В связи с этим возникают проблемы обезжиривания, транспортировки или утилизации шлама, что удорожает и осложняет эксплуатацию.

Метод адсорбции. Основан на физических свойствах некоторых твердых тел с ультрамикроскопической структурой селективно извлекать и концентрировать на своей поверхности отдельные компоненты из газовой смеси. В пористых телах с капиллярной структурой поверхностное поглощение дополняется капиллярной конденсацией.

Адсорбция подразделяется на физическую адсорбцию и хемосорбцию. При физической адсорбции молекулы газа прилипают к поверхности твердого тела под действием межмолекулярных сил притяжения (силы Ван-дер-Ваальса). Высвобождающаяся при этом теплота зависит от силы притяжения и по порядку значения (как правило, они находятся в пределах от 2 до 20 кДж/моль) совпадает с теплотой конденсации паров. Преимущество физической адсорбции — обратимость процесса. При уменьшении давле-

ния адсорбата в потоке газа либо при увеличении температуры поглощенный газ легко десорбируется без изменения химического состава. Обратимость данного процесса исключительно важна, если экономически выгодно рекуперировать адсорбируемый газ или адсорбент.

В основе хемосорбции лежит химическое взаимодействие между адсорбатом и адсорбируемым веществом. Действующие при этом силы сцепления значительно больше, чем при физической адсорбции соответственно и высвобождающаяся при хемосорбции теплота существенно больше и по порядку значения (от 20 до 400 кДж/моль) совпадает с теплотой реакции. Ввиду большой теплоты адсорбции энергия, необходимая для взаимодействия хемосорбированной молекулы с молекулой другого сорта, может быть существенно меньше энергии, необходимой для реакции молекул двух различных видов непосредственно в газовой фазе, т. е. поверхность твердого вещества может оказаться катализатором, увеличивающим скорость некоторых химических реакций. Процесс хемосорбции, как правило, необратим: при десорбции меняется химический состав адсорбата. Поэтому если желательна регенерация адсорбента или рекуперация адсорбата, то адсорбирующую среду следует выбирать таким образом, чтобы преобладали процессы физической адсорбции.

В качестве адсорбентов или поглотителей применяют вещества, имеющие большую площадь поверхности на единицу массы. Так, удельная поверхность активированных углей достигает 10^5—10^6 $м^2/кг$. Их применяют для очистки газов от органических паров, удаления неприятных запахов и газообразных примесей, содержащихся в незначительных количествах в промышленных выбросах, а также летучих растворителей и целого ряда других газов. В качестве адсорбентов применяют также простые и комплексные оксиды (активированный глинозем, силикагель, активированный оксид алюминия, синтетические цеолиты или молекулярные сита), которые обладают бо́льшей селективной способностью, чем активированные угли. Однако их нельзя использовать для очистки очень влажных газов. Некоторые адсорбенты иногда пропитывают соответствующими реактивами, повышающими эффективность адсорбции, так как на поверхности адсорбента происходит хемосорбция.

Одним из основных параметров при выборе адсорбента является адсорбционная способность по извлекаемому компоненту. Адсорбционная способность, или масса вещества a, поглощенная единицей массы адсорбента в произвольный момент времени, зависит от концентрации адсорбируемого вещества (парциального давления p, Па) у поверхности адсорбента, общей площади этой поверхности, физических, химических и электрических свойств адсорбируемого вещества и адсорбента, температурных условий и присутствия других примесей.

В качестве характеристики адсорбционных свойств пористых тел используют зависимость адсорбционной способности от парциального давления поглощаемого газового компонента при постоянной температуре (изотерма адсорбции):

$$a = \varphi(p) \text{ при } T = \text{const}.$$

На рис. 37 изображены наиболее часто встречающиеся типы изотерм адсорбции. Во всех случаях адсорбционная способность сорбента возрастает при повышении давлений адсорбата, но характер этого роста различен. Выпуклая изотерма *1* специфична для адсорбции на мелкодисперсных сорбентах, применяемых для очистки газовой смеси при малом парциальном давлении извлекаемых примесей и для осушки. Изотерма *2* типична для непористых адсорбентов при полимолекулярной физической адсорбции. Изотерма *3* наблюдается на адсорбентах с развитой системой крупных и средних пор. Эти сорбенты целесообразно применять для извлечения летучих газов при парциальном давлении, близком к давлению насыщения.

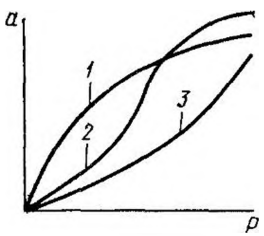

Рис. 37. Изотермы адсорбции

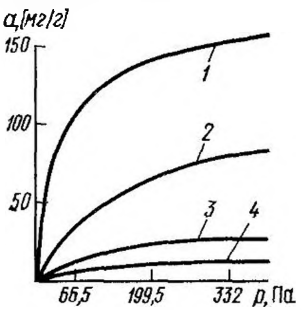

Рис. 38 Изотермы адсорбции SO_2 на активированном угле СКТ при различных температурах, °С:
1 — 20, *2* — 50; *3* — 100; *4* — 150

В основе инженерно-технического расчета адсорбционного метода очистки должна находиться сетка кривых, отражающая равновесие поглощаемого компонента с адсорбентом, т. е. сетка изотерм адсорбции. На рис. 38 представлены изотермы адсорбции SO_2 на активированном угле СКТ в диапазоне температур от 20 до 150°С. Как видно, с увеличением температуры происходит снижение адсорбционной способности активированного угля. На этом свойстве адсорбентов основан процесс их регенерации. Регенерацию осуществляют либо нагревом насыщенного адсорбента до температуры, превышающей рабочую, либо продувкой его паром или горячим газом.

Конструктивно адсорберы (рис 39) выполняются в виде вертикальных, горизонтальных либо кольцевых емкостей, заполненных пористым адсорбентом, через который фильтруется поток очищаемого газа. Выбор конструкции определяется скоростью газовой смеси, размером частиц адсорбента, требуемой степенью очистки и рядом других факторов. Вертикальные адсорберы, как правило, применяют при небольших объемах очищаемого газа; горизонтальные и кольцевые при высокой производительности, достигающей десятков и сотен тысяч м^3/ч.

Фильтрация газа происходит через неподвижный (адсорберы периодического действия) или движущийся слой адсорбента. Наиболее распространены адсорберы периодического действия, в которых период контактирования очищаемого газа с твердым адсорбентом чередуется с периодом регенерации адсорбента.

Установки периодического действия (с неподвижным слоем адсорбента) отличаются конструктивной простотой, но имеют низкие допускаемые скорости газового потока и, следовательно, повышенную металлоемкость и громоздкость Процесс очистки в таких аппаратах имеет периодический характер, т е. отработанный, потерявший активность поглотитель время от времени заменяют либо регенерируют. Существенный недостаток таких аппаратов —

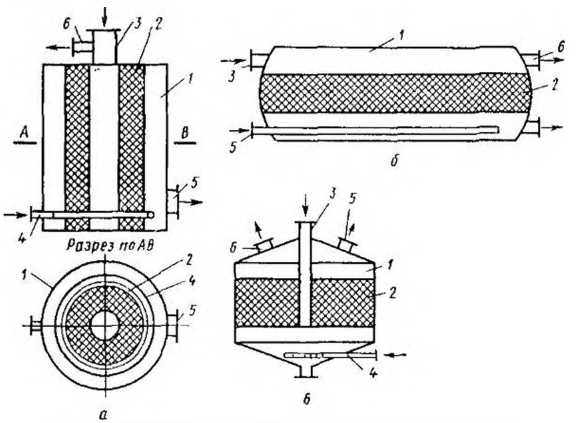

Рис 39 Конструктивные схемы адсорберов·

а — вертикальный, *б* — горизонтальный; *в* — кольцевой, *1* — адсорбер, *2* — слой активированного угля; *3* — центральная труба для подачи паровоздушной смеси при адсорбции; *4* — барботер для подачи острого пара при десорбции, *5* — труба для выхода инертных по отношению к поглотителю газов при адсорбции, *6* — труба для выхода пара при десорбции

большие энергетические затраты, связанные с преодолением гидравлического сопротивления слоя адсорбента.

Движение адсорбента в плотном слое под действием силы тяжести или в восходящем потоке очищаемого воздуха обеспечивает непрерывность работы установки, что позволяет полнее использовать адсорбционную способность сорбента, организовать

процесс десорбции, а также упростить условия эксплуатации оборудования. В качестве недостатка этих методов следует отметить значительные потери адсорбента за счет ударов частиц друг о друга и истирания о стенки аппарата.

На рис. 40 представлена схема адсорбционной установки для удаления SO_2 из горячего топочного газа Основным агрегатом установки служит адсорбер *1*, который заполнен древесным активированным углем. Горячий топочный газ проходит теплообменник *2*, подогревает воздух, поступающий в топку, и подается в нижнюю часть адсорбера, где при температуре 150—200°С происходит улавливание SO_2. Очищенный дымовой газ выбрасывается в атмосферу через дымовую трубу. Адсорбент после насыщения переводится в десорбер *5*, где с помощью подогревателя *3* поддерживается температура 300—600°С Богатый оксидом серы газ выводится из десорбера и может быть полезно использован Регенерированный адсорбент поступает в бункер *4* и затем с помощью ковшового элеватора поступает в верхнюю часть адсорбера.

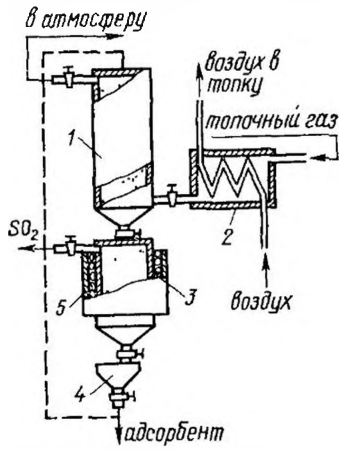

Рис 40 Адсорбционная установка для удаления SO_2 из горячего топочного газа

При проектировании адсорбера используют следующие исходные данные: объемный расход очищаемого газа Q, м³/с, концентрация удаляемой примеси c_0, мг/м³, и давление отходящих газов p, Па. В результате расчета определяют потребную массу адсорбента, конструктивные размеры, гидравлическое сопротивление аппарата и время защитного действия адсорбера.

На первом этапе расчета и проектирования адсорбера выбирают рабочую температуру и тип сорбента. Для увеличения адсорбционной способности сорбента рабочую температуру, как правило, выбирают минимально возможной Выбор типа сорбента производится по изотермам адсорбции при рабочих параметрах температуры и концентрации примеси из условия минимальной массы сорбента.

Минимальную необходимую массу сорбента определяют из уравнения материального баланса по улавливаемому компоненту:

$$m_з = 10^3 \frac{Qc_0\tau}{a_\infty} k_з,$$

где a_∞ — статическая поглотительная способность адсорбента в рабочих условиях, мг/кг адсорбента; τ — время процесса адсорбции, с; $k_з$ — коэффициент запаса, равный 1,1—1,2.

Скорость потока газа в адсорбере $w_г$ рассчитывают исходя из допустимого падения давления Δp в адсорбере:

$$w_г = \sqrt[3]{\frac{4k_ф \Delta p d_э П_н^3 \rho_н Q_г}{3\xi \rho_г (1 - П_н) m_а}},$$

где $k_ф = 1{,}5 d_з l_з (l_з + 0{,}5 d_з)^{-1} (1{,}5 d_з^2 l_з)^{-1{,}3}$ — коэффициент формы зерна сорбента, учитывающий неравнодоступность всей поверхности зерна обдувающему потоку; $d_э$ — эквивалентный диаметр зерна сорбента, м³, для цилиндрических зерен длиной $l_з$ и диаметром $d_з$ равен

$$d_э = \frac{П_н d_з l_з}{(1 - П_н)(0{,}5 d_з + l_з)};$$

$П_н = (\rho_к - \rho_н)/\rho_к$ — пористость слоя сорбента определяется через кажущуюся $\rho_к$ и насыпную $\rho_н$ плотности сорбента; ξ — коэффициент гидравлического сопротивления, определяемый в зависимости от режима течения газа; при $Re < 50$ $\xi = 220/Re$, при $50 \leqslant Re \leqslant 7200$ $\xi = 11{,}6/Re^{0{,}25}$, где $Re = w_г d_э \rho_г / \mu$ — критерий Рейнольдса. Обычно, исходя из условий осуществления необходимого времени контакта газа с сорбентом и минимальных гидравлических сопротивлений, $w_г$ выбирают в пределах 0,15—0,5 м/с.

Геометрические размеры адсорбера (диаметр $D_а$ и длина $L_а$ слоя адсорбента) подсчитывают по формулам:

$$D_а = \sqrt{\frac{4Q_г}{\pi w_г П_н}}; \quad L_а = \frac{4m_а}{\pi \rho_н D_а^2}.$$

Время защитного действия адсорбера определяют, исходя из характера кривой изотермы адсорбции. Для области изотермы адсорбции, в которой соблюдается закон Генри ($a = Гc$, где Г — безразмерный коэффициент Генри, равный отношению количества адсорбированного вещества a_0 к начальной концентрации вещества в газовом потоке c_0), продолжительность адсорбции τ определяют по формуле

$$\tau = \left[L_а \sqrt{\frac{60Г}{w_г}} - b\sqrt{\frac{Г}{\beta S_{уд}}}\right]^2,$$

где $S_{уд} = 4(1 - П_н)(d_з l_з)^{-1}(0{,}5 d_з + l_з)$ — удельная поверхность адсорбента, м²/м³. Коэффициент b определяют (табл. 38) в зависимости от отношения содержания поглощаемого вещества в газовом потоке на выходе и входе адсорбера:

Таблица 38

c/c_0	b	c/c_0	b	c/c_0	b
0,005	1,84	0,1	0,94	0,5	0,07
0,01	1,67	0,2	0,63	0,6	—0,10
0,03	1,35	0,3	0,42	0,8	—0,27
0,05	1,19	0,4	0,23	0,9	—0,68

Коэффициент массопередачи β, c^{-1}, определяют в зависимости от режима течения газа:

$$\beta = 0{,}833\,\mathrm{Re}^{0,47}\,\mathrm{Pr}^{0,35}\,\frac{D}{d_э^2} \quad \text{при } \mathrm{Re} < 30;$$

$$\beta = 0{,}53\,\mathrm{Re}^{0,64}\,\mathrm{Pr}_д^{0,33}\,\frac{D}{d_э^2} \quad \text{при } \mathrm{Re} \text{ от } 30 \text{ до } 50,$$

где $\mathrm{Pr} = \nu/D$ — диффузионный критерий Прандтля; ν — коэффициент кинематической вязкости газа при рабочих условиях, м/с; $D = D_0(T/T_0)^{1,5}(p_0/p)$ — коэффициент диффузии улавливаемого газа в воздухе, м²/с; D_0 — коэффициент диффузии при $T_0 = 273$ К и $p_0 = 101{,}3$ кПа.

Для области изотермы адсорбции, в которой соблюдается уравнение Лэнгмюра [$a = ABc(1 + Ac)^{-1}$, где A и B — константы, зависящие от свойств адсорбента и адсорбируемого вещества], продолжительность адсорбции определяют по формуле

$$\tau = \frac{60a_0}{w_г c_0}\left\{L_a - \frac{w_г}{60\beta S_{уд}}\left[\frac{c_0}{c_1}\ln\left(\frac{c_0}{c_к} - 1\right) + \ln\left(\frac{c_0}{c_к} - 1\right)\right]\right\},$$

где c_1 — содержание вещества в газовом потоке, равновесное с количеством вещества, равным половине a_∞, кг/м³.

Для области изотермы адсорбции, где величина адсорбции практически не зависит от содержания вещества в газовом потоке (т. е. $a \approx B$), продолжительность адсорбции определяют по формуле

$$\tau = \frac{60a_0}{w_г c_0}\left[La - \frac{w_г}{60\beta S_{уд}}\ln\left(\frac{c_0}{c_к} - 1\right)\right].$$

Если полученное время защитного действия адсорбера отличается от заданного τ на величину $\Delta\tau$, то длину аппарата меняют на величину $\Delta L_a = \frac{Q_г c_0 \Delta\tau}{\rho_н F a_\infty}$ и пересчитывают массу сорбента. Остальной расчет корректировки не требует.

Адсорбция эффективна при удалении больших концентраций загрязняющих веществ (при этом необходима высокая адсорбци-

онная емкость или большая масса адсорбента). В тех случаях, когда концентрации загрязнителей невелики и обработке подвергается большое количество воздуха, адсорбция может оказаться эффективной для удаления летучих углеводородов и органических растворителей. Этот метод применим в случаях, когда загрязняющий газ трудно или невозможно сжечь, когда необходима гарантированная рекуперация достаточно ценной примеси, когда нужно удалить пары ядовитых веществ и предполагаемых канцерогенов.

Адсорбцию широко используют при удалении паров растворителя из отработанного воздуха при окраске автомобилей, органических смол и паров растворителей в системе вентиляции предприятий по производству стекловолокна и стеклотканей, а также паров эфира, ацетона и других растворителей в производстве нитроцеллюлозы и бездымного пороха. Адсорбенты также применяют для очистки выхлопных газов автомобилей; для удаления ядовитых компонентов (например, сероводород из газовых потоков), выбрасываемых в атмосферу через лабораторные вытяжные шкафы; для удаления радиоактивных газов при эксплуатации ядерных реакторов, в частности радиоактивного иода.

В некоторых случаях (например, при обработке горючих газов) для разрушения токсичных органических веществ может быть использовано *дожигание*. Однако применение этого метода затруднено тем, что концентрации органических примесей, распределенных в большом объеме воздуха, очень низки. Для того чтобы нагреть такой объем воздуха до температур, при которых проводится термическая нейтрализация, расходуется большое количество энергии Экономичность процесса дожигания может быть значительно повышена благодаря адсорбционному концентрированию загрязнений перед дожиганием. Адсорбционное концентрирование целесообразно при объемных концентрациях загрязнителя до 300 $млн^{-1}$, причем эффективность адсорбционной обработки резко возрастает с увеличением объема обрабатываемого газа.

Термическая нейтрализация. Метод основан на способности горючих токсичных компонентов (газы, пары и сильно пахнущие вещества) окисляться до менее токсичных при наличии свободного кислорода и высокой температуры газовой смеси. Этот метод применяется в тех случаях, когда объемы выбросов велики, а концентрации загрязняющих веществ превышают 300 $млн^{-1}$.

Методы термической нейтрализации вредных примесей во многих случаях имеют преимущества перед методами адсорбции и абсорбции. Отсутствие шламового хозяйства, небольшие габариты очистных установок, простота их обслуживания, а в ряде случаев и пожарная автоматизация их работы, высокая эффективность обезвреживания при низкой стоимости очистки и другие положительные качества явились причиной их широкого распространения в машиностроительной промышленности.

Область применения метода термической нейтрализации вредных примесей ограничивается характером образующихся при окислении продуктов реакции. Так, при сжигании газов, содержащих фосфор, галогены, серу, образующиеся продукты реакции по токсичности во много раз превышают исходный газовый выброс. Исходя из этого, метод термического обезвреживания применим для выбросов, включающих токсичные компоненты органического происхождения, но не содержащие галогены, серу и фосфор.

Различают три схемы термической нейтрализации газовых выбросов: прямое сжигание в пламени, термическое окисление и каталитическое сжигание. Прямое сжигание в пламени и термическое окисление осуществляют при температурах 600—800°С; каталитическое сжигание — при 250—450°С. Выбор схемы нейтрализации определяется химическим составом загрязняющих веществ, их концентрацией, начальной температурой газовых выбросов, объемным расходом и предельно допустимыми нормами выброса загрязняющих веществ.

Прямое сжигание следует использовать только в тех случаях, когда отходящие газы обеспечивают подвод значительной части энергии, необходимой для осуществления процесса. Из экономических соображений этот вклад должен превышать 50% общей теплоты сгорания При проектировании устройств прямого сжигания необходимо знать пределы взрываемости или воспламеняемости сжигаемых отходов и газообразного топлива в смесях с воздухом. Эти данные показывают, будет ли данный вид газообразных отходов поддерживать горение без дополнительного подвода топлива. Для безопасности транспортировки сжигание газов в промышленных масштабах осуществляется при концентрациях горючих компонентов не более 25% от нижнего предела взрываемости.

Одна из проблем, затрудняющих осуществление прямого сжигания, связана с тем, что температура пламени может достигать 1300°С. При наличии достаточного избытка воздуха и длительном выдерживании газа при высокой температуре это приводит к образованию оксидов азота. Тем самым процесс сжигания, обезвреживая загрязняющие вещества одного типа, становится источником загрязняющих веществ другого типа.

Примером процесса прямого сжигания является сжигание углеводородов, содержащих токсичные газы (например, цианистый водород), непосредственно в факеле, т. е. просто в открытой горелке, направленной вертикально вверх. Факел применяют главным образом для сжигания горючих отходов, с трудом поддающихся другим видам обработки.

Существует ряд конструктивных решений, позволяющих осуществлять прямое сжигание вредных примесей в замкнутой камере. Основные требования, предъявляемые к конструкциям таких камер, — обеспечение высокой степени турбулентности газового потока и времени пребывания его в камере в пределах 0,2—

0,7 с. Типичными областями применения камерных дожигателей с открытым пламенем является дожигание газов для удаления органических отходов от лакокрасочных цехов, отходящих газов стержневых печей и оксидов азота, образующихся в процессе нитрования.

Институтом газа АН УССР разработана и успешно прошла промышленные испытания установка очистки газовых выбросов лакокрасочного производства. Установка представляет собой циклонную топку (рис. 41), скомпонованную с газовой горелкой и камерой разбавления газов после их очистки. Воздух, загрязненный токсическими примесями органических веществ (толуол, ксилол и др.), поступает в вихревую двухзонную горелку *2* по каналу *6* и непосредственно во внутреннюю полость печи *4* по тангенциальным каналам *5*. Природный газ подается в горелку по трубе *3*. Время пребывания в полости не менее 0,5 с и контакт их с раскаленными стенками камеры обеспечивают полноту их сгорания. Атмосферный воздух подается по центральной трубе *1* горелки только при обезвреживании выбросов, содержащих менее 15% кислорода. Запуск установки, вывод на рабочий режим и его поддержание осуществляются с помощью блока автоматического управления и регулирования установки.

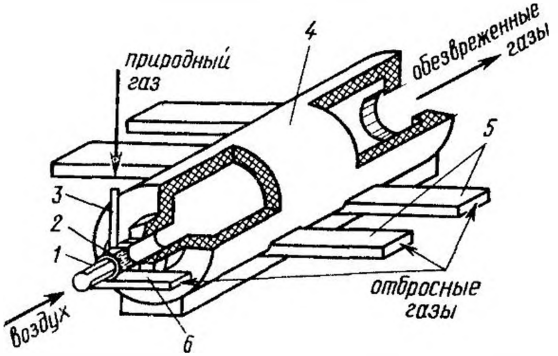

Рис. 41. Установка очистки газообразных выбросов лакокрасочного производства

Системы огневого обезвреживания обеспечивают эффективность очистки 0,90—0,99, если время пребывания вредностей в высокотемпературной зоне не менее 0,5 с и температура обезвреживания газов, содержащих углеводороды, не менее 500—650°С, а содержащих оксид углерода — 660—750°С.

Термическое окисление применяют либо когда отходящие газы имеют высокую температуру, но в них нет достаточного количества кислорода, либо когда концентрация горючих примесей настолько низка, что они не обеспечивают подвод теплоты, необходимой для поддержания пламени.

Важнейшими факторами, которые должны учитываться при проектировании устройств термического окисления, — время, температура и турбулентность. Время в аппарате должно быть достаточным для полного сгорания горючих компонентов. Обычно оно составляет от 0,3 до 0,8 с. Турбулентность характеризует степень

механического перемешивания, необходимого для обеспечивания эффективного контактирования кислорода и горючих примесей. Рабочие температуры зависят от характера горючих примесей. Так, при окислении углеводородов рациональный интервал температур 500—760°С, при окислении оксида углерода 680—800°С, при устранении запаха посредством окисления 480—680°С.

Если отходящие газы имеют высокую температуру, то процесс дожигания происходит в камере с подмешиванием свежего воздуха. Так, например, происходит дожигание оксида углерода в газах, удаляемых системой вентиляции от электродуговых плавильных печей, дожигание продуктов неполного сгорания (CO и C_nH_m) автомобильного двигателя непосредственно на выходе из цилиндров в условиях добавки избыточного воздуха.

В тех случаях, когда температура отходящих газов недостаточна для протекания процесса окисления, поток отходящих газов подогревают в теплообменнике, а затем пропускают через рабочую зону, в которой сжигают природный или какой-либо другой высококалорийный газ. При этом горючие компоненты отходящих газов доводят до температур, превышающих точки их самовоспламенения, и они сгорают под действием кислорода, обычно присутствующего в потоке загрязненного газа. При недостатке кислорода его вводят в поток отходящих газов при помощи воздуходувки, эжектирования или вентилятора. Одно из простейших устройств, используемых для огневого обезвреживания технологических и вентиляционных низкотемпературных выбросов, схематически представлено на рис. 42. Загрязненный отходящий газ через

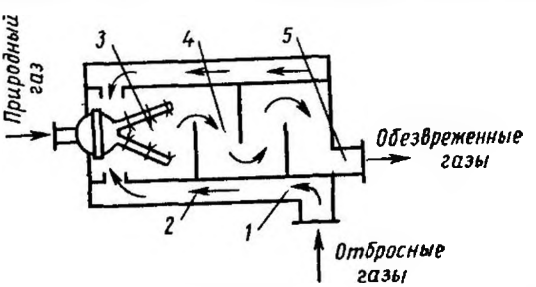

Рис. 42. Установка для огневого обезвреживания технологических и вентиляционных выбросов

входной патрубок *1* и полость теплообменника-подогревателя *2* поступает в V-образную полость коллектора горелки *3*. При этом горючие компоненты отходящих газов доводят до необходимой температуры и сжигают в кислороде, присутствующем в потоке загрязненного газа. Процесс догорания происходит в камере смешения *4*, где хвостовая часть факела контактирует с обезвреживаемыми выбросами при их турбулизации перегородками камеры. Выходящие из патрубка *5* газы могут либо выбрасываться непо-

средственно в атмосферу, либо пропускаться через дополнительный теплообменник с целью рекуперации теплоты горячих газов.

Основное преимущество термического окисления — относительно низкая температура процесса, что позволяет сократить расходы на изготовление камеры сжигания и избежать значительного образования оксидов азота.

Расчеты процессов термического окисления выполняют с целью определения количества дополнительного газообразного топлива, необходимого для достижения требуемой температуры обрабатываемых отходящих газов; объема газообразных продуктов сгорания и объема камеры сгорания.

Объемный расход дополнительного газообразного топлива $Q_{пг}$, м^3/с, зависит от количества теплоты $q_г$, кДж/с, необходимого для повышения температуры обрабатываемого газа от начальной до температуры сгорания (ориентировочно определяют из значений энтальпий для воздуха) и теплотворной способности топлива $q_R^{пг}$, кДж/м^3, природного газа: $Q_{пг}=q_г/q_R^{пг}$.

Суммарный расход газообразных продуктов в устройстве для дожигания определяют как сумму объемного расхода продуктов сгорания, вычисляемого по стехиометрии реакции окисления, и объемного расхода обрабатываемого газа. Эта величина позволяет определить диаметр сопла горелки. Оптимальная скорость газа, проходящего через сопло горелки, обеспечивающая наиболее эффективное перемешивание продуктов сгорания и загрязненного газа, должна составлять 4,5—7,5 м/с.

Диаметр камеры сгорания определяют, исходя из необходимости обеспечения достаточного времени пребывания и интенсивности турбулентности. Для устройств термического окисления рациональное время пребывания газа в камере сгорания находится в пределах 0,3—0,9 с.

Каталитический метод используют для превращения токсичных компонентов промышленных выбросов в вещества безвредные или менее вредные для окружающей среды путем введения в систему дополнительных веществ — *катализаторов*. Каталитические методы основаны на взаимодействии удаляемых веществ с одним из компонентов, присутствующих в очищаемом газе, или со специально добавляемым в смесь веществом. Катализатор, взаимодействуя с одним из реагирующих соединений, образует промежуточное вещество, которое распадается с образованием продукта регенерированного катализатора.

Каталитическое окисление выгодно отличается от термического кратковременностью протекания процесса (иногда достаточно нескольких долей секунды), что позволяет резко сократить габариты реактора. Кроме того, при пропускании газообразных отходов через слой катализатора температура, необходимая для осуществления реакции органических газов и паров с кислородом,

существенно снижена (до 300°С) по сравнению с термическим окислением.

Методы подбора катализаторов разнообразны, но все они, как правило, базируются на эмпирических или полуэмпирических способах. Основной критерий выбора катализаторов — их активность и долговечность Об активности катализатора судят по количеству продукта, получаемого с единицы объема катализатора, или по объемной скорости каталитического процесса, при которых обеспечивается требуемая степень обезвреживания обрабатываемого газа. Объемную скорость определяют как отношение расхода обрабатываемого газа ($м^3/ч$), приведенного к нормальным условиям, к объему катализаторной массы ($м^3$). Степень обезвреживания 0,85—0,95 обычно достигается при объемной скорости от 2000 до 60 000 $ч^{-1}$.

Для осуществления каталитического процесса необходимы незначительные количества катализатора, расположенного таким образом, чтобы обеспечить максимальную поверхность контакта с газовым потоком. Каталитический слой должен создавать умеренно низкий перепад давления, обеспечивать структурную целесообразность и долговечность катализатора. В большинстве случаев катализаторами могут быть металлы (платина, палладий и другие благородные металлы) или их соединения (оксиды меди, марганца и т. п.). Катализаторная масса обычно выполняется из шаров, колец, пластин или проволоки, свитой в спираль из нихрома, никеля, оксида алюминия с нанесенными на их поверхность (сотые доли % к массе катализатора) благородных металлов. Например, катализаторы, разработанные в Дзержинском филиале НИИОГАЗа, позволяющие при температуре 350—420 °С и скорости обезвреживания 30 000—60 000 $ч^{-1}$ практически полностью окислять примеси этилена, пропилена, бутана, пропана, ацетальдегида, спиртов (метилового, этилового, пропилового и др), ацетона, этилацетона, бензола, толуола, ксилола и др , выполнены в виде нихромовой проволоки 0,4—0,5 мм, свитой в спираль диаметром 4—5 мм с нанесенным на ее поверхность в виде активной пленки платины и палладия.

Объем катализаторной массы определяют, исходя из максимальной скорости обезвреживания газа, которая, в свою очередь, зависит от природы и концентрации вредных веществ в отходящем газе, температуры и давления каталитического процесса и активности катализатора. Каталитическая активность нарастает в зависимости от молекулярного строения улавливаемых соединений в следующем порядке: ароматические углеводороды < парафины разветвленного строения < парафины линейного строения < олефины < ацетиленовые углеводороды. Высшие углеводороды окисляются легче, чем низшие.

Осуществление каталитических процессов иногда затрудняется возможным отравлением катализатора некоторыми примесями, со-

держащимися в газовых выбросах. Присутствие в обрабатываемом газе железа, свинца, кремния и фосфора, а также соединений серы сокращает срок службы многих катализаторов или подавляют их активность Возможность отравления существенно затрудняет выбор эффективных катализаторов для дожигания выбросов подвижных источников газообразных отходов.

Существенное влияние на скорость и эффективность каталитического процесса оказывает температура газа. Для каждой реакции, протекающей в потоке газа, характерна так называемая минимальная температура начала реакции, ниже которой катализатор не проявляет активности. Температура начала реакции зависит от природы и концентрации улавливаемых вредностей. В табл. 38

Таблица 38

Окисляемое вещество	Температура начала реакции, °С	Окисляемое вещество	Температура начала реакции, °С
Альдегиды	173. 234	Оксид углерода	316...343
Ацетилен	207...241	Пропан	293...332
Бензин	261...298	Растворитель	260...400
Бензол	277.. 300	Тринитротолуол	219. .250
Ксилол	200...340	Толуол	200...250
Лаки	316...371	Фенол	216...427
Нитротолуол	265.. 297	Этанол	261...293

приведены оптимальная температура окисления некоторых веществ на катализаторах.

С повышением температуры эффективность каталитического процесса увеличивается. Например, метан начинает окисляться на поверхности катализатора, состоящего из 60% диоксида марганца и 40% оксида меди, только при температуре 320°С, а 97%-ное реагирование наблюдается при $t=450$°С. Следует иметь в виду, что для каждого катализатора существует предельный температурный уровень. У многих катализаторов максимальная рабочая температура составляет 800—850°С. Превышение этого уровня приводит к снижению активности, а затем к разрушению катализатора.

Различают два конструктивных варианта газоочистных каталитических устройств:

— реакторы каталитические, в которых происходит контакт газового потока с твердым катализатором, размещенным в отдельном корпусе;

— реакторы термокаталитические — аппараты, в которых в общем корпусе размещены контактный узел и подогреватель.

Примером простейшей конструкции каталитического реактора очистки газов является реактор унифицированного сборочного комплекса типа УКС-39, разработанного Минским конструкторско-технологическим институтом (МКТЭИ), представляющий собой

прямоугольный сварной теплоизолированный корпус, одна из стенок которого выполнена съемной для обеспечения возможности монтажа-демонтажа кассеты с катализатором. Реактор предназначен для оснащения в комплексе с электроподогревателем и специальным капельным теплообменником сушильных камер окрасочных линий предприятия машиностроения.

Наиболее многочисленную группу современных аппаратов каталитического обезвреживания органических соединений и оксида углерода представляют термокаталитические реакторы очистки газов, в которых рекуператор теплоты, подогреватель и контактный узел размещены в одном корпусе. На рис. 43 представлен каталитический реактор, разработанный Дзержинским филиалом НИИОГАЗа, предназначенный для окисления толуола, содержащегося в газовоздушных выбросах цехов окраски. Воздух, содержащий примеси толуола, подогревается в межтрубном пространстве теплообменника-рекуператора *1*, откуда по переходным каналам поступает в подогреватель *4*. Продукты сгорания природного газа, сжигаемого в горелках *5*, смешиваются с воздухом, повышая его температуру до 250—350°С, т. е. до уровня, обеспечивающего оптимальную скорость окисления толуола на поверхности катализатора. Процесс химического превращения происходит на поверхности катализатора *3*, размещенного в контактном устройстве *2*. В качестве катализатора применена природная марганцевая руда (пиромзит) в виде гранул размером 2—5 мм, промотированных азотнокислым палладием. В результате окисления толуола образуются нетоксичные продукты: диоксид углерода и водяные пары ($C_7H_8+9O_2 \rightarrow 7CO_2+4H_2O$). Смесь воздуха и продуктов реакции при температуре 350—450°С направляется в рекуператор *1*, где отдает тепло газовоздушному потоку, идущему на очистку, и затем через выходной патрубок выводится в атмосферу. Эффективность очистки такого реактора составляет 0,95—0,98 при расходе вспомогательного топлива (природного газа) 3,5—4,0 м³ на 1000 м³ очищаемого воздуха. Гидравлическое сопротивление реактора при номинальной нагрузке (800—900 м³/ч) не превышает 150—180 Па. Скорость процесса находится в пределах от 8000 до 10 000 объемов на объем катализаторной массы в 1 ч.

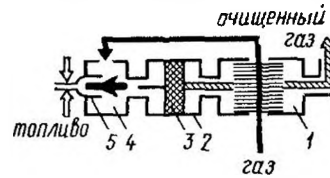

Рис 43. Каталитический реактор:
1 — теплообменник-рекуператор; *2* — контактное устройство; *3* — катализатор, *4* — подогреватель; *5* — горелка природного газа

Каталитические методы очистки применяют и для нейтрализации выхлопных газов автомобилей.

Помимо вышеизложенных методов газоочистки промышленных выбросов, для удаления неприятных запахов биологического происхождения, для организации газоочистки в процессах пане-

сения лаковых покрытий в автомобильной промышленности и литейных цехах в ряде стран (ФРГ, Швейцария, Нидерланды и др.) начали применять биохимические методы газоочистки.

Биохимические методы газоочистки основаны на способности микроорганизмов разрушать и преобразовывать различные соединения. Разложение веществ происходит под действием ферментов, вырабатываемых микроорганизмами под влиянием отдельных соединений или группы веществ, присутствующих в очищаемых газах.

Биохимические методы газоочистки более всего применимы для очистки отходящих газов постоянного состава. При частом изменении состава газа микроорганизмы не успевают адаптироваться к новым веществам и вырабатывают недостаточное количество ферментов для их разложения, в результате чего биологическая система будет обладать слабой разрушающей способностью по отношению к вредным компонентам газов. Высокий эффект газоочистки достигается при условии, что скорость биохимического окисления уловленных веществ больше скорости их поступления из газовой фазы.

Различают две группы аппаратов биохимической очистки газов: *биофильтры* и *биоскрубберы*. Биоскрубберами называют абсорбционные аппараты (абсорберы, скрубберы), в которых орошающей жидкостью (абсорбентом) служит водяная суспензия активного ила. Содержащиеся в очищаемых газах вредные вещества улавливаются абсорбентом и расщепляются микроорганизмами активного ила Так как биохимические реакции протекают с относительно небольшой скоростью, для обеспечения высокой эффективности работы газоочистной установки требуется промежуточная емкость, которая может быть выполнена в виде отдельного реактора или встроена в основание абсорбера.

В биофильтрах очищаемый газ пропускают через слой фильтра-насадки, орошаемой водой для создания необходимой влажности, достаточной для поддержания жизнедеятельности микроорганизмов. Насадкой служат природные (почва, торф, компост и др) или искусственные материалы. При использовании последних на них предварительно выращивают биологически активную пленку орошением водой или суспензией активного ила.

Способность активного ила к расщеплению уловленных веществ устанавливается по соотношению полной биохимической потребности в кислороде ($БПК_п$) до начала процессов нитрификации и химической потребности в кислороде (ХПК), которая характеризует окисление вещества до диоксида углерода и воды. При отношении $БПК_п:ХПК \geqslant 0{,}5$ вещества поддаются биохимическому окислению.

Эффективная работа биофильтров обеспечивается за счет равномерного распределения очищаемого воздуха по всей фильтрующей поверхности, равномерной влажности (20—50%) и плотно-

сти фильтрующего слоя, поддержания оптимальных температур (25—35°С) и значения pH 6,5—8,5.

Выбор метода очистки определяется технико-экономическим расчетом и зависит от: концентрации загрязнителя в очищаемом газе и требуемой степенью очистки, зависящей от фонового загрязнения атмосферы в данном регионе; объемов очищаемых газов и их температуры; наличия сопутствующих газообразных примесей и пыли; потребности в тех или иных продуктах утилизации и наличии требуемого сорбента; размеров площадей, имеющихся для сооружения газоочистной установки; наличия необходимого катализатора, природного газа и т. д.

При выборе аппаратурного оформления для новых технологических процессов, а также при реконструкции действующих установок газоочистки необходимо руководствоваться следующими требованиями: максимальная эффективность процесса очистки в широком диапазоне нагрузочных характеристик при малых энергетических затратах; простота конструкции и ее обслуживания; компактность и возможность изготовления аппаратов или отдельных узлов из полимерных материалов; возможность работы на циркуляционном орошении или на самоорошении Главный принцип, который должен быть положен в основу проектирования очистных сооружений, — это максимально возможное удержание вредных веществ, теплоты и возврат их в технологический процесс.

§ 17. СНИЖЕНИЕ ТОКСИЧНОСТИ ВЫБРОСОВ ТРАНСПОРТНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Повышение экологических показателей автомобиля возможно за счет проведения комплекса мероприятий по совершенствованию его конструкции и режима эксплуатации. К улучшению экологических показателей автомобиля приводят: повышение его экономичности; замена бензиновых ДВС на дизельные; перевод ДВС на использование альтернативных топлив (сжатый или сжиженный газ, этанол, метанол, водород и др.); применение нейтрализаторов отработавших газов ДВС; совершенствование режима работы ДВС и технического обслуживания автомобиля.

Повышение топливной экономичности автомобиля достигается главным образом за счет совершенствования процесса сгорания в ДВС: послойное сжигание топлива; форкамерно-факельное сжигание; применение подогрева и испарения топлива во впускном тракте; использование электронного зажигания. Дополнительными резервами повышения экономичности автомобиля являются:

— снижение массы автомобиля за счет усовершенствования его конструкции и применения неметаллических и высокопрочных материалов (например, автомобиль ВАЗ-2108 имеет массу на 100 кг меньше, чем его предшественники; у автомобиля «Москвич» Ижев-

ского автозавода снижена масса на 272 кг по сравнению с первыми выпусками этой модели);

— улучшение аэродинамических показателей кузова (последние модели легковых автомобилей обладают, как правило, на 30—40% меньшим коэффициентом лобового сопротивления);

— снижения сопротивления воздушных фильтров и глушителей, отключения вспомогательных агрегатов, например вентилятора и т. п;

— снижения массы перевозимого топлива (неполное заполнение баков) и массы инструментов

Современные модели легковых автомобилей существенно отличаются по топливной экономичности от предшествующих моделей:

Марка автомобиля	Расход бензина л/100 км при скорости 90 км/ч
«Москвич» АЗЛК-2141	5,9
«Москвич-412» (1967—1975)	—/11,3*
«Лада-Спутник» ВАЗ-2108	5,7
ВАЗ-2101 (1970—1983)	—/10,8
«Таврия» ЗАЗ-1102	4,8/7,6
«Ока» ВАЗ-1111	4,5

Перспективные марки легковых автомобилей будут обладать расходом бензина 3,5 л/100 км и менее Повышение экономичности автобусов и грузовых автомобилей достигается прежде всего применением дизельных ДВС. Они обладают экологическими преимуществами по сравнению с бензиновыми ДВС, поскольку имеют меньший на 25—30% удельный расход топлива; кроме того, состав отработавших газов у дизельного ДВС менее токсичен (см. табл. 12). В СССР намечено довести выпуск дизельных грузовых автомобилей и автопоездов до 40—45% общего выпуска. Начато производство грузовых автомобилей ЗИЛ-4421 с дизельным двигателем мощностью 136 кВт и расходом топлива 26,5 л/100 км при скорости 60 км/ч и производство грузового автомобиля ГАЗ-6008 мощностью 92 кВт.

Экологическими преимуществами по сравнению с бензиновыми ДВС обладают двигатели, работающие на альтернативных топливах. Общее представление о снижении токсичности ДВС при переходе на альтернативное топливо можно получить из данных, приведенных в табл. 39 для автомобиля ГАЗ-24.

В СССР намечено значительно расширить производство автомобилей, работающих на сжатом и сжиженном газе. Перевод на газовое топливо не предусматривает значительных изменений в конструкции ДВС, однако сдерживается отсутствием станций заправки и необходимого количества автомобилей, переоборудованных для работы на газе. Кроме того, автомобиль, переоборудо-

* В знаменателе расход бензина при городском цикле езды, л/100 км.

ванный для работы на газовом топливе, теряет грузоподъемность из-за наличия баллонов и запас хода приблизительно в 2 раза (200 км против 400—500 км у бензинового автомобиля). Эти недостатки частично устранимы при переводе автомобиля на сжиженный природный газ.

Таблица 39

Топливо	Выбросы, %	
	CO	NO_x
Бензин	100	100
Природный газ	60	74
Метанол	50	55

Применение метанола и этанола требует изменений конструкции в ДВС, так как спирты более химически активны к резинам, полимерам, медным сплавам. В конструкцию ДВС необходимо вводить дополнительный подогреватель для запуска двигателя в холодный период года (при $t < -25°C$); необходима перерегулировка карбюратора, так как изменяется стехиометрическое отношение расхода воздуха к расходу топлива. У бензиновых ДВС оно равно 14,7; у двигателей на метаноле — 6,45, а на этаноле — 9. За рубежом (Бразилия) применяют смеси бензина и этанола в пропорции 12:10, что позволяет использовать бензиновые ДВС с незначительными изменениями их конструкции, несколько повышая при этом экологические показатели двигателя.

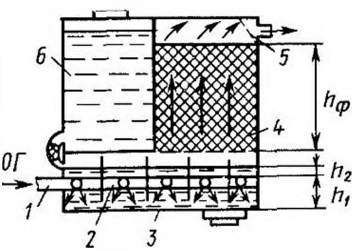

Рис. 44. Схема жидкостного нейтрализатора

Значительное снижение токсичности ДВС достигается при использовании нейтрализаторов отработавших газов (ОГ) Нейтрализатор — это дополнительное устройство, которое вводится в выпускную систему двигателя для снижения токсичности ОГ. Известны жидкостные, каталитические, термические и комбинированные нейтрализаторы [3].

Принцип действия жидкостных нейтрализаторов основан на растворении или химическом взаимодействии токсичных компонентов ОГ при пропускании их через жидкость определенного состава: вода, водный раствор сульфита натрия, водный раствор двууглекислой соды.

На рис. 44 представлена схема жидкостного нейтрализатора, применяемого с двухтактным дизельным двигателем. Отработавшие газы поступают в нейтрализатор по трубе *1* и через коллек-

тор *2* попадают в бак *3*, где вступают в реакцию с рабочей жидкостью. Очищенные газы проходят через фильтр *4*, сепаратор *5* и выбрасываются в атмосферу. По мере испарения жидкость доливают в рабочий бак из дополнительного бака *6*.

Пропускание ОГ дизелей через воду приводит к уменьшению запаха, альдегиды поглощаются с эффективностью 0,5, а эффективность очистки от сажи достигает 0,60—0,80. При этом несколько уменьшается содержание бенз(а)пирена в ОГ дизелей. Температура газов после жидкостной очистки составляет 40—80°С, примерно до этой же температуры нагревается и рабочая жидкость. При снижении температуры процесс очистки идет интенсивнее.

Жидкостные нейтрализаторы не требуют времени для выхода на рабочий режим после пуска холодного двигателя. Недостатки жидкостных нейтрализаторов: большая масса и габариты; необходимость частой смены рабочего раствора; неэффективность по

Таблица 40

Вещество	Концентрация, об. доли, %		Степень очистки, %
	до нейтрализации	после нейтрализации	
CO	0,06	0,06	0
NO_x	0,002	0,001	50
Альдегиды	0,0144	0,003	98
SO_2	0,008	0	100

отношению к CO; малая эффективность (0,3) по отношению к NO_x; интенсивное испарение жидкости. Однако использование жидкостных нейтрализаторов в комбинированных системах очистки может быть рациональным, особенно для установок, отработавшие газы которых должны иметь низкую температуру при поступлении в атмосферу.

При расчете жидкостного нейтрализатора определяют его основные размеры и необходимое количество раствора для работы в течение определенного времени. Используемый для дизельных автосамосвалов МАЗ нейтрализатор НТЖ-2 представляет собой металлическую сварную конструкцию прямоугольной формы высотой 530 мм, шириной 608 мм и содержит в рабочем баке 55 л раствора.

Средние значения концентраций вредных компонентов ОГ до и после жидкостного нейтрализатора, полученные на автосамосвале МАЗ-205, приведены в табл. 40.

Каталитическая нейтрализация отработавших газов ДВС на поверхности твердого катализатора происходит за счет химических превращений (реакции окисления или восстановления), в результа-

те которых образуются безвредные или менее вредные для окружающей среды и здоровья человека соединения.

Катализаторы на основе благородных металлов (платина, палладий, рутений, радий и др.) наиболее широко используют для очистки отработавших газов ДВС. Эти катализаторы характеризуются хорошей селективностью в реакциях нейтрализации токсичных компонентов, низкими температурами начала эффективной работы, достаточной температуростойкостью, долговечностью и способностью устойчиво работать при высоких скоростях газового потока. Основной недостаток катализаторов этого типа — их высокая стоимость. Рутений, радий и иридий широко используют в качестве добавок к платиновым и палладиевым катализаторам, способным работать в широком диапазоне изменения состава рабочей смеси двигателя.

Для восстановления оксида азота применяют катализаторы на основе переходных металлов, в частности меди, хрома, кобальта, никеля и их сплавов. Эти катализаторы менее долговечны, чем Pt и Pd; их эффективность заметно ниже при высоких объемных скоростях химических реакций; эффективная нейтрализация продуктов неполного сгорания достигается на таких катализаторах при более высоких температурах, чем на платиновых. Поэтому, несмотря на высокую стоимость, для каталитической нейтрализации отработавших газов чаще используют катализаторы на основе благородных металлов.

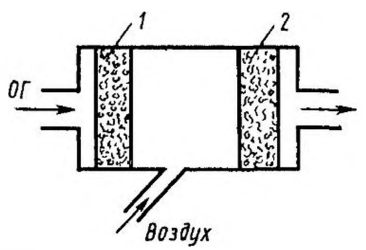

Рис. 45. Схема двухступенчатого (трехкомпонентного) каталитического нейтрализатора

Для нейтрализации в отработавших газах NO_x, CO и C_nH_m применяют двухступенчатый каталитический нейтрализатор (рис. 45), состоящий из последовательно соединенных восстановительного *1* и окислительного *2* катализаторов. Отработавшие газы через патрубок поступают к восстановительному катализатору. На этом катализаторе нейтрализация окислов азота происходит по реакции (для ДВС с искровым зажиганием NO_x на 99% состоит из NO)

$$NO + CO \rightarrow 0{,}5N_2 + CO_2$$

$$NO + H_2 \rightarrow 0{,}5N_2 + H_2O$$

Для обеспечения восстановительной среды перед первой ступенью нейтрализатора двигатель должен быть отрегулирован для работы с α, близким к стехиометрическому. При $\alpha > 1{,}05$ активность катализатора резко уменьшается (среда становится окислительной). После восстановительного катализатора к отработавшим газам для создания окислительной среды подводится через патрубок вторич-

ный воздух. На окислительном катализаторе происходит нейтрализация продуктов неполного сгорания CO и C_nH_m. Основными процессами являются окисление оксидов углерода и углеводородов:

$$CO + 0{,}5O_2 \rightarrow CO_2$$

$$C_nH_m + (n + 0{,}25m)\,O_2 \rightarrow nCO_2 + 0{,}5mH_2O$$

Результаты испытаний автомобиля с двухступенчатым каталитическим нейтрализатором (в 1-й ступени — медноникелевый сплав, во 2-й — платина) приведены в табл. 41.

Таблица 41

Автомобиль	Концентрация токсических веществ		
	NO_x, мг/м³	C_nH_m, %	CO, мг/м³
Без нейтрализатора	1759	100	9100
С нейтрализатором	283	46	3500

В СССР применяют в основном окислительные каталитические нейтрализаторы. Эффективность работы нейтрализатора, его массовые и габаритные показатели, создаваемое им противодавление выпуску ОГ зависят в основном от характера протекания газодинамических и массообменных процессов.

Одной из основных задач при проектировании нейтрализатора является определение длины каталитического слоя, через который проходят газы в процессе нейтрализации. В общем случае длина слоя, необходимая для достижения заданной степени очистки, зависит от скорости кинетических превращений и потока. Однако вследствие большой скорости реакции, достигаемой на платиновых катализаторах в области малых концентраций оксида углерода, основным фактором, определяющим общую скорость ее окисления, становится диффузия. Практически это означает, что расчет каталитических нейтрализаторов для обезвреживания продуктов неполного сгорания ОГ можно без большой погрешности выполнять, учитывая только процессы массопередачи в диффузионной области.

Расчет профиля концентраций по длине слоя гранулированного катализатора производится по формуле

$$\frac{c_x}{c_0} = \exp\left[-\frac{S_v x}{1{,}38 S_c^{2/3}\,(\mathrm{Re}^{0{,}41} - 1{,}5)}\right],$$

где c_x — текущая концентрация компонента по координате x; c_0 — исходная концентрация компонента на входе в реактор; S_v — удельная поверхность насыпного катализатора; $S_c = \nu/D$ — число Шмидта; ν — коэффициент кинематической вязкости; D — коэффициент

диффузии; $Re = wd_к/\nu$ — число Рейнольдса; w — средняя скорость течения газа через каналы, образующие слой; $d_к$ — диаметр отдельной гранулы насыпного слоя катализатора.

Значения коэффициента диффузии некоторых веществ:

Компонент	CO	C_6H_6	$C_6H_5—CH_3$
D, м²/с	$1{,}4 \cdot 10^{-5}$	$7{,}5 \cdot 10^{-5}$	$0{,}71 \cdot 10^{-5}$

Степень очистки ОГ от вредных веществ при $x = l$ составит $\eta = 1 - c_l/c_0$, где l — длина слоя катализатора.

Для слоя сферических частиц $S_V = 6(1-П)/d_к$, где П — пористость.

Полное сопротивление нейтрализатора включает потери давления на входе, активной зоне и выходе:

$$\Delta p_\Sigma = \Delta p_{вх} + \Delta p_{акт} + \Delta p_{вых}.$$

Потери на входе ($\Delta p_{вх}$) и выходе ($\Delta p_{вых}$) определяют по формулам гидравлики, а потери давления в слое — по уравнению $\Delta p_{акт} = \zeta_c \rho w^2 l/(2d_п)$, где

$$\zeta_c = \frac{152}{Re_к}\left(1 + 0{,}0056\, Re_к^{0,9} П^{-1,72}\right). \qquad (12)$$

В качестве скорости при определении числа Рейнольдса необходимо использовать скорость ОГ в порах, равную $w = Q_{ОГ}/(F_к П)$, где $F_к$ — площадь поперечного сечения катализатора с пористостью П. Число Рейнольдса в формуле (12) определяют по соотношению $Re_к = wd_п/\nu$, где $d_п = 2П d_к/[(1-П)3]$.

Газодинамика слоя катализатора является только одним из факторов, определяющих аэродинамические характеристики нейтрализатора в целом. В частности, равномерность распределения газа по поверхности слоя зависит не столько от абсолютной потери давления в нем, сколько от отношения кинетической энергии потока газа во входной полости над реактором к перепаду давления на слое. Это относится и к выходной полости нейтрализатора.

Приемлемое для практических целей равномерное распределение потока газа достигается, если выполняется условие $\Delta p_{вх}/\Delta p_{акт} < 0{,}15—0{,}2$. С учетом этого условия, а также требований компактности степень расширения входного диффузора выбирают в пределах 2—2,5.

Доводку нейтрализатора, как правило, проводят экспериментально. Опыт показывает, что допустимая степень неравномерности распределения газа по поверхности нейтрализатора обеспечивается, если скорость потока во входном и выходном сечениях нейтрализатора выбрана достаточно малой, а перепад давления на слое составляет не менее 40% общего сопротивления нейтрализатора. Экспериментальные исследования позволяют сформулировать достаточно простые правила, которых надо придерживаться при проектировании каталитических нейтрализаторов: длина гранулирован-

ного слоя катализатора для карбюраторного ДВС должна составлять 10—15 диаметров гранулы, а для дизельного в 2—2,5 раза больше; приведенная к нормальным условиям скорость газа по полному сечению реактора (скорость фильтрации) не должна превышать 1 м/с.

Каталитические нейтрализаторы конструктивно состоят из входного и выходного устройств, корпуса и заключенного в него реактора. Разработаны каталитические нейтрализаторы (рис. 46) для отработавших газов ДВС транспортных средств с бензиновыми и дизельными двигателями. Каталитические нейтрализаторы снижают в ОГ содержание СО на 70—90%, C_nH_m — на 50—85%. Основные параметры каталитических нейтрализаторов для автобуса ЛиАЗ-667 следующие: объем реактора 2,5 дм^3; длина 553; ширина 307; высота 243 мм; масса 15 кг.

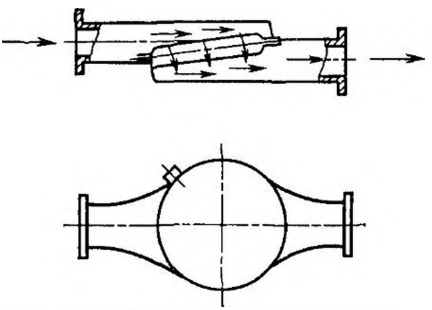

Рис. 46 Каталитический нейтрализатор для бензинового ДВС

Схема установки каталитического нейтрализатора в системе ДВС показана на рис. 47. Отработавшие газы от двигателя *1* поступают по выпускной трубе *2* к каталитическому нейтрализатору *3*, после чего выбрасываются в атмосферу. Для поддержания необходимой температуры газов в нейтрализаторе используется электронный блок *4*, регулирующий клапаном *5* подачу воздуха через ресивер *6* и обратный клапан *7* из атмосферы в нейтрализатор.

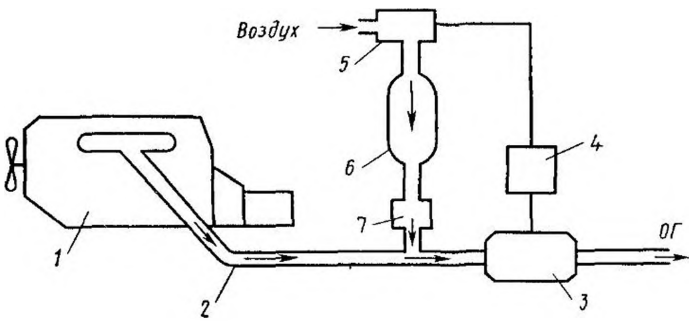

Рис 47. Схема установки каталитического нейтрализатора

В 1980 г. 4% выпускаемых в мире легковых и грузовых автомобилей оснащено дизелями, а к концу 80-х годов этот показатель возрос до 25% . При этом дизели стали значительным источником выброса твердых частиц в атмосферу. Для улавливания сажи

известно несколько конструкций устройств, использующих как принцип электростатической очистки, так и метод фильтрации.

Одним из лучших конструктивных решений для снижения содержания твердых частиц в выхлопе дизелей считается установка фильтров регенеративного типа Фильтр (рис. 48, *а*) представляет собой сотовую конструкцию с ячейками прямоугольного сечения. Материал фильтра — пористый кордиерит обладает достаточной механической прочностью, стойкостью к агрессивным химическим веществам, сопротивлением к оплавлению и образованию трещин при тепловых воздействиях, а также термической стабильностью.

Фильтр (рис. 48, *б*), выполненный в виде нескольких последовательно расположенных пористых перегородок, обладает повышенной эффективностью очистки.

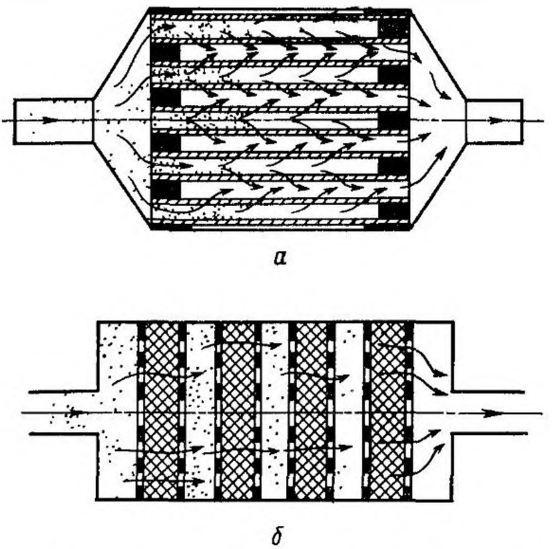

Рис. 48. Схема фильтров-сажеуловителей с сотовой (*а*) и многослойной насадкой (*б*)

Накопившиеся в фильтре частицы следует периодически удалять предпочтительно термическим окислением. Для этого отходящие газы нагревают до 450°С и выше, что приводит к воспламенению накопившейся сажи. Данные, полученные при проведении эксперимента с дизелем рабочим объемом 2,3 л, по определению концентрации основных примесей в отработавших газах дизеля, приведены в табл. 42.

Сажеуловители дизельных ДВС должны обеспечивать ресурс 10 000 км и более при незначительном увеличении гидравлического

Таблица 42

Схема выпуска отработавших газов	Концентрация, г/км			
	углеводороды C_nH_m	CO	NO_x	твердые частицы
Без фильтра	0,312	0,937	0,784	0,169
С чистым керамическим фильтром	0,337	0,931	0,700	0,031

сопротивления, что обеспечивается периодической (примерно через 100 км пробега) регенерацией фильтроэлемента. Конструктивно фильтроэлементы выполняют в виде многоканальных моноблоков, объемно-проволочных элементов и в виде намотанных на перфорированную трубу стеклокерамических нитей, допускающих регенерацию при 600°С.

Несмотря на то что выбросы токсичных веществ (C_nH_m и CO) из картера и топливной системы двигателя по крайней мере на порядок ниже выбросов выхлопных газов, в настоящее время разрабатываются [3] методы сжигания картерных газов ДВС. Известна замкнутая схема нейтрализации картерных газов с подачей их во впускной трубопровод двигателя с последующим дожиганием. Замкнутая система вентиляции картера с возвращением картерных газов до карбюратора уменьшает выделение в атмосферу углеводородов на 10—30%, оксидов азота на 5—25%, но при этом увеличивается выброс оксида углерода на 10—35%. При возвращении картерных газов после карбюратора снижается выброс C_nH_m на 10—40%, CO на 10—25%, но возрастает выброс NO_x на 10—40%.

Для предотвращения выбросов паров бензина из топливной системы, основная часть которых поступает в атмосферу, когда двигатель не работает, на автомобилях устанавливают систему обезвреживания испарений топлива из карбюратора и топливного бака [3], состоящую из трех основных узлов (рис. 49): герметичного топливного бака *1* со специальной емкостью *2* для компенсации теплового расширения топлива; крышки *3* топливно-заправочной горловины бака с двусторонним предохранительным клапаном для предотвращения чрезмерного давления или разрежения в баке; адсорбера *4* для поглощения паров топлива при выключенном двигателе с системой возврата паров во впускной тракт двигателя во время его работы. В качестве адсорбента используют активированный уголь.

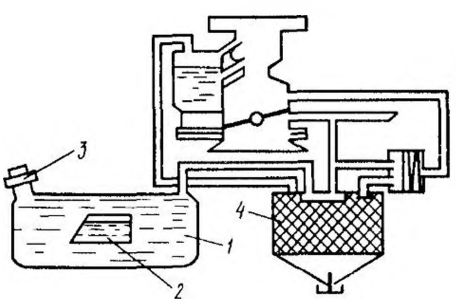

Рис. 49. Схема улавливания паров топлива бензинового ДВС

Соблюдение регламента технического обслуживания и контроль состава ОГ ДВС позволяет значительно сократить токсичные выбросы в атмосферу. Известно, что при 160 тыс. км пробега и при отсутствии контроля выбросы CO возрастают в 3,3 раза, а C_nH_m — в 2,5 раза.

Повышение экологических показателей ГТДУ достигается совершенствованием процесса сгорания топлива, применением альтернативного топлива (сжиженный газ, водород и др.), рациональной организацией движения в аэропортах.

Увеличение времени пребывания продуктов сгорания в камере сгорания ГТДУ сопровождается увеличением полноты сгорания (уменьшение содержания CO и C_nH_m в продуктах сгорания) и содержания в них оксидов азота. Поэтому, изменяя время пребывания газа в камере сгорания, можно достичь лишь минимальной токсичности продуктов сгорания, а не устранить ее полностью.

Более эффективным средством снижения токсичности ГТДУ является применение способов подачи топлива, обеспечивающих более равномерное смещение топлива и воздуха. К ним относятся устройства с предварительным испарением топлива, форсунки с аэрацией топлива и др. Испытания на модельных камерах свидетельствуют о том, что такими способами можно снизить содержание в продуктах сгорания C_nH_m более чем на порядок, CO — в несколько раз, обеспечить бездымный выхлоп и уменьшить содержание NO_x.

Существенное снижение содержания NO_x в продуктах сгорания ГТДУ достигается при стадийном процессе сгорания топлива в двухзонных камерах сгорания. В таких камерах основная часть топлива на режимах большой тяги сжигается в виде предварительно подготовленной бедной смеси ($\alpha>1$). Меньшая часть топлива ($\sim 25\%$) сжигается в виде богатой смеси ($\alpha\leqslant 1$), где и образуются в основном оксиды азота. Опыты показывают, что при таком сгорании можно снизить содержание NO_x в ~ 2 раза.

Решение экологических проблем, связанных с применением ракетной техники, основано на использовании экологически безопасного топлива и прежде всего кислорода и водорода.

§ 18. РАССЕИВАНИЕ ВЫБРОСОВ В АТМОСФЕРЕ

Распространение в атмосфере выбрасываемых из труб и вентиляционных устройств промышленных выбросов подчиняется законам турбулентной диффузии. На процесс рассеивания выбросов существенное влияние оказывают состояние атмосферы, расположение предприятий и источников выбросов, характер местности, физические и химические свойства выбрасываемых веществ, высота источника, диаметр устья и т. п. Горизонтальное перемещение примесей определяется в основном скоростью ветра, а вертикальное — распределением температур в вертикальном направлении.

На рис. 50 показано распределение концентрации вредных веществ в атмосфере над факелом организованного высокого источника выброса. По мере удаления от трубы в направлении распространения промышленных выбросов можно условно выделить три зоны загрязнения атмосферы: переброс факела выбросов, характеризующийся относительно невысоким содержанием вредных веществ в приземном слое атмосферы; задымление с максималь-

ным содержанием вредных веществ и постепенное снижение уровня загрязнения.

Зона задымления является наиболее опасной для населения и должна быть исключена из селитебной застройки. Размеры этой зоны в зависимости от метеорологических условий находятся в пределах 10—49 высот трубы.

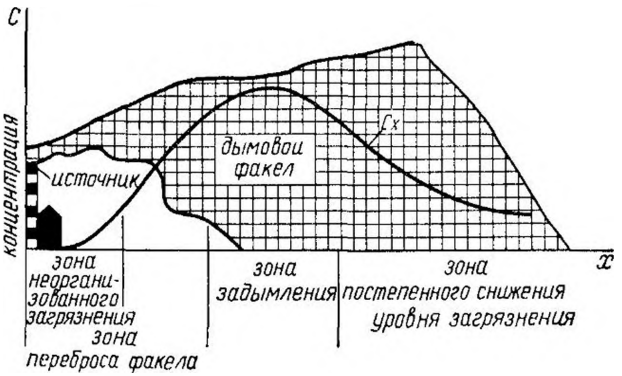

Рис. 50. Распределение концентрации вредных веществ в атмосфере от организованного высокого источника выбросов

Максимальная концентрация прямо пропорциональна производительности источника и обратно пропорциональна квадрату его высоты над землей. Подъем горячих струй почти полностью обусловлен подъемной силой газов, имеющих более высокую температуру, чем окружающий воздух. Повышение температуры и момента количества движения выбрасываемых газов приводит к увеличению подъемной силы и снижению их приземной концентрации.

При выбросах через высокие трубы или при факельном выбросе в условиях безветрия рассеивание вредных веществ происходит главным образом под действием вертикальных потоков. Высокие скорости ветра увеличивают разбавляющую роль атмосферы, способствуя более низким приземным концентрациям в направлении ветра. Движение загрязняющих веществ вместе с воздушными массами, перемещаемыми ветром, приводит к тому, что турбулентные вихри изгибают, разрывают поток и перемешивают его с окружающими воздушными массами. Разбавление вдоль оси струи пропорционально средней скорости ветра v_m на высоте струи. Вместе с тем с увеличением v_m уменьшается высота факела над устьем трубы. Поэтому для источников выбросов вводят понятие *опасной скорости ветра*, при которой приземные концентрации имеют наибольшие значения. Для того чтобы предотвратить отклонение струи вблизи от горловины трубы, скорость выбрасываемого газа $w_г$ долж-

на вдвое превышать опасную скорость ветра на уровне горловины трубы.

Распространение газообразных примесей и пылевых частиц диаметром менее 10 мкм, имеющих незначительную скорость осаждения, подчиняется общим закономерностям. Для более крупных частиц эта закономерность нарушается, так как скорость их осаждения под действием силы тяжести возрастает. Поскольку при очистке токсичной пыли крупные частицы улавливаются, как правило, легче, чем мелкие, в выбросах остаются очень мелкие частицы, их рассеивание в атмосфере рассчитывают так же, как и газовые выбросы.

Согласно СНиП 2.04.05—86 «Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха» предельно допустимая концентрация пыли $c_п$, мг/м^3, в технологических и вентиляционных выбросах, подвергаемых рассеиванию, определяется в зависимости от объема выбрасываемого воздуха L, тыс. м^3/ч. При объеме более 15 тыс. м^3/ч $c_п = 100\,k$; при объеме 15 тыс. м^3/ч и менее $c_п = k(160-4L)$, где k — коэффициент, принимаемый в зависимости от ПДК$_{рз}$ пыли в воздухе рабочей зоны помещения на постоянных рабочих местах:

ПДК$_{рз}$, мг/м^3	$\leqslant 2$	$>2 \div 4$	$>4 \div 6$	$>6 \div 10$
k	0,3	0,6	0,8	1,0

Выбросы воздуха с концентрацией пыли, превышающей $c_п$, не допускается рассеивать в атмосферу без предварительной очистки. При устройстве систем очистки запыленного воздуха от пыли с частицами размером 20 мкм и более эффективность очистки должна быть не менее 0,90.

В зависимости от расположения и организации выбросов источники загрязнения воздушного пространства подразделяют на затененные и не затененные, линейные и точечные. Точечные источники используют, когда удаляемые загрязнения сосредоточены в одном месте. К ним относят выбросные трубы, шахты, крышные вентиляторы и другие близко расположенные источники. Выделяющиеся из них вредные вещества при рассеивании в циркуляционной зоне не накладываются одно на другое на расстоянии двух высот здания (с заветренной стороны). Линейные источники имеют значительную протяженность в направлении, перпендикулярном к ветру. Это аэрационные фонари, открытые окна, близко расположенные вытяжные шахты и крышные вентиляторы. Незатененные, или высокие, источники свободно расположены в недеформированном потоке ветра. К ним относят высокие трубы, а также точечные источники, удаляющие загрязнения на высоту, превышающую 2,5 $H_{зд}$. Затененные, или низкие, источники расположены в зоне подпора или аэродинамической тени, образующейся на здании или за ним (в результате обдувания его ветром) на высоте $h \leqslant 2{,}5\,H_{зд}$.

Основным документом, регламентирующим расчет рассеивания и определения приземных концентраций выбросов промышленных

предприятий, является «Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. ОНД-86». В основу методики положено условие, при котором суммарная концентрация каждого вредного вещества не должна превышать максимальную разовую предельно допустимую концентрацию данного вредного вещества в атмосферном воздухе, т. е.

$$c_{\Sigma} = (c_m + c_{\text{ф}}) \leqslant \text{ПДК},$$

где c_m — максимальная концентрация загрязняющих веществ в приземном воздухе, создаваемая источниками выбросов, мг/м^3; $c_{\text{ф}}$ — фоновая концентрация одинаковых или однонаправленных вредных веществ, характерная для данной местности (принимается по справке органов санитарно-эпидемиологической службы), мг/м^3.

При одновременном присутствии в атмосферном воздухе нескольких веществ, обладающих аддитивными свойствами для каждой точки местности, должно выполняться условие:

$$\sum_{i=1}^{n} \frac{c_{m_i} + c_{\text{ф}_i}}{\text{ПДК}_i} \leqslant 1,$$

где i означает i-ю примесь.

При выбросе в атмосферу одного или более однонаправленных загрязняющих веществ из нескольких источников (одинаковой или разной высоты), расположенных на значительном расстоянии друг от друга, загрязнения приземного слоя атмосферы рассчитывают для каждой трубы. Полученные результаты для данной точки местности суммируют с учетом падения концентраций в перпендикулярном ветру направлении y. В зависимости от соотношения валовых выбросов из источников и расстояния между ними в перпендикулярном по отношению к ветру направлении максимальная суммарная концентрация загрязняющих веществ будет находиться или на оси источника бо́льшей мощности, или между источниками, но ближе к источнику бо́льшей мощности.

В случае расчета рассеивания выбросов, выделяемых в атмосферу через трубы одинаковой высоты, расположенные на близком расстоянии друг от друга, трубы следует принимать за один эквивалентный источник такой же высоты с суммарным количеством загрязняющих веществ. При расположении более двух соседних точечных источников по одной линии и совпадении с нею направления ветра выбросы будут накладываться один на другой, что приведет к увеличению приземных концентраций. Шахматное расположение сосредоточенных источников приводит к уменьшению концентрации примесей в приземном слое атмосферы.

Согласно действующей методике минимальная высота $H_{\min}$ одноствольной трубы для рассеивания газовоздушных выбросов, имеющих температуру выше температуры окружающего воздуха, определяют по формуле

$$H_{min} = \sqrt{\frac{AMk_F mn}{ПДК - c_ф}} \sqrt[3]{\frac{1}{Q\Delta T}},$$

где A — коэффициент, зависящий от температурного градиента атмосферы и определяющий условия вертикального и горизонтального рассеивания вредностей, $с^{2/3} \cdot мг \cdot гр^{1/3}/г$ (в зависимости от метеорологических условий принимает значения: 240 — для субтропической зоны Средней Азии А; 200 — для Казахстана Нижнего Поволжья, Кавказа, Молдавии, Сибири, Дальнего Востока и остальных районов Средней Азии, 160 — для Севера и Северо-Запада европейской части территории СССР, Среднего Поволжья, Урала и Украины, 120 — для Центральной части европейской территории СССР); M — масса среднего вещества, выбрасываемого в атмосферу в единицу времени, г/с, Q — объем расходуемой газовоздушной смеси, выбрасываемой из всех труб, $м^3/с$; k_F — коэффициент, учитывающий скорость оседания взвешенных частиц выброса в атмосфере (для газов равен 1, для пыли при эффективности очистки газоочистной установки — более 0,90), $k_F = 2,5$ и менее 0,75 $k_F = 3$; ΔT — разность между температурой выбрасываемой газовоздушной смеси и температурой окружающего атмосферного воздуха, равной средней температуре самого жаркого месяца в 13 ч; m и n — безразмерные коэффициенты, учитывающие условия выхода газовоздушной смеси из устья источника выброса

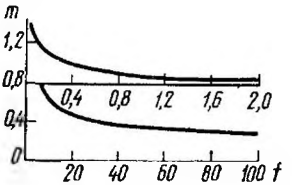

Рис. 51. Зависимость коэффициента m от параметра f

Значение безразмерного коэффициента m определяют по графику (рис 51) в зависимости от параметра:

$$f = 10^2 \frac{w_г^2 D}{H_{min}^2 \Delta T},$$

где $w_г$ — средняя скорость выхода газов из устья источника, м/с; $D = 1,13\sqrt{Q/w_г}$ — диаметр устья источника выбросов, м.

Значение безразмерного коэффициента n определяют в зависимости от опасной скорости v_m, м/с:

$$v_m = 0,65\sqrt[3]{Q\Delta T/H_{min}};$$

$$v_m \leqslant 0,3 \quad n = 3,0; \quad v_m > 2 \quad n = 1,0;$$

$$0,3 < v_m \leqslant 2,0 \quad n = 3 - \sqrt{(v_m - 0,3)(4,36 - v_m)}.$$

Максимальная концентрация вредных веществ у земной поверхности достигается на оси факела выброса (по направлению среднего за рассматриваемый период ветра) на расстоянии x_m от источника выброса и не должна превышать максимальную разовую концентрацию данного вещества в атмосфере:

$$c_m = \frac{AMk_F mn}{H^2 \sqrt[3]{Q\Delta T}} \leqslant (ПДК - c_ф).$$

Если коэффициент, учитывающий скорость оседания взвешенных частиц выброса в атмосфере $k_F < 2$, то $x_m = k_d H$, если $k_F \geqslant 2$, то $x_m = \frac{5 - k_F}{4} k_d H$.

Значение безразмерного параметра k_d находят по номограмме (ОНД-86) либо расчетным способом:

$$v_m \leqslant 2{,}0 \quad k_d = 4{,}95 v_m \left(1 + 0{,}28 \sqrt[3]{f}\right);$$

$$v_m > 2{,}0 \quad k_d = 7{,}0 \sqrt{v_m} \left(1 + 0{,}28 \sqrt[3]{f}\right).$$

Распределение концентрации вредных веществ в приземном слое атмосферы по оси факела на различных расстояниях x от источника выброса находят по формуле $c_x = S_1 c_m$ Безразмерная величина S_1 зависит от отношения x/x_m (рис 52), при $x/x_m > 8$ она зависит от скорости оседания взвешенных частиц выбросов.

Приземную концентрацию вредных веществ в атмосфере c_y на расстоянии y от поверхности земли определяют по формуле $c_y = S_2 c_x$ Безразмерная величина S_2 зависит от скорости ветра v_m, м/с, расстояния от источника выброса и высоты над поверхностью земли:

$$S_2 = \left[1 + 8{,}4 v_m \left(\frac{y}{x}\right)^2\right]^{-1{,}0} \left[1 + 28{,}2 v_m^2 \left(\frac{y}{x}\right)^4\right]^{-1{,}0}.$$

Для выброса холодной газовоздушной смеси (температура выбрасываемых газов близка к температуре окружающего воздуха) через одиночную трубу с круглым сечением устья минимальная высота трубы

$$H_{\min} = \sqrt[4]{\left(\frac{AMk_F n}{\text{ПДК} - c_\text{ф}} \frac{D}{8Q}\right)^2}.$$

Высота трубы — важный фактор, воздействующий на уровни приземных концентраций вредных веществ. Следует иметь в виду, что с увеличением высоты отдельно стоящей трубы ее стоимость возрастает примерно пропорционально кубу высоты. Поэтому иногда экономически целесообразно подвергать выбрасываемый воздух более тщательной очистке

Приведенный в нормативах ОНД-86 коэффициент A установлен для сравнительно часто наблюдаемых условий температурной стратификации атмосферы При резком ухудшении условий рекомендуется снижать производительность предприятий для уменьшения выбросов в атмосферу Такое решение проблемы более выгодно по сравнению со строительством труб большой высоты

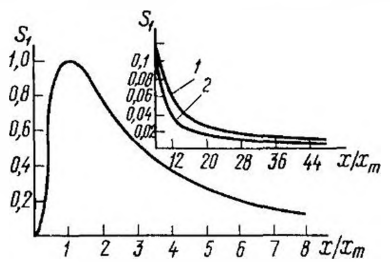

Рис. 52. Зависимость безразмерной величины S_1 от x/x_m:
1 — для аэрозолей $k_F > 2{,}0$, 2 — для газообразных выбросов $k_F = 1{,}0$

Значительная часть вредных веществ на машиностроительных заводах поступает в атмосферу из низких затененных источников. Процессы распространения вредных веществ из низких затененных источников и из высоких незатененных труб отличаются друг от друга. Дополнительным специфическим фактором является изменение зданиями направления и скорости ветра, образование циркуляционных зон и зон повышения скоростей.

Метод расчета рассеивания примесей от затененных источников выбросов, расположенных на крышах отдельно стоящих узких зданий, предложенный В. М. Эльтерманом, позволяет определить значение и место нахождения максимальной концентрации примесей в

заветренной или единой циркуляционной зоне. За расчетную скорость ветра принимают опасную скорость, при которой будут иметь место максимальные концентрации вредного вещества на заводской площадке.

Согласно этой методике при рассеивании загрязненного воздуха из низких затененных труб или шахт максимальную концентрацию вредных веществ в приземном слое воздуха на заводской площадке определяют по уравнению

$$c_{m\text{т}} = \frac{530 M \varphi E k_{l\text{т}}}{D w_{\text{г}} H_{\text{зд}}},$$

где φ — коэффициент скорости, учитывающий поле скоростей над зданием, обдуваемым ветром, $k_{l\text{т}}$ — коэффициент, учитывающий изменение максимальной концентрации в приземном слое от относительной длины здания $l/H_{\text{зд}}$; l и $H_{\text{зд}}$ — длина и высота здания, м, $w_{\text{г}}$ — вертикальная составляющая скорости выхода загрязненного воздуха, м/с,

$$E = Be^{-0,15B^2}; \quad B = \sqrt{\bar{h}^2 + 3,3} - \bar{h}; \quad \bar{h} = (H_{\text{тр}} - H_{\text{зд}})/H_{\text{зд}}.$$

Значения коэффициента φ и параметров E и B приведены ниже:

$\bar{h}$	0	0,25	0,5	0,75	1,0	1,2
φ	0,8	1,0	1,1	1,2	1,4	1,4
B	0,55	0,635	0,72	0,81	0,93	1,02
E	1,11	0,83	0,59	0,40	0,26	0,18

Для зданий, расположенных среди застройки, и для широких зданий одной высоты $\varphi = 1,2$; для зданий, находящихся в зоне аэродинамической тени впереди стоящего здания или в зоне подпора, $\varphi = 0,8$.

Опасная скорость ветра для затененного точечного источника, при которой будут иметь место максимальные концентрации вредного вещества в приземном слое атмосферы,

$$v_m = 1,5\varphi \sqrt[3]{Q/H_{\text{зд}}}.$$

На выхлопных трубах, удаляющих загрязненный воздух, не следует устанавливать зонты, которые гасят скорость на выходе из трубы и направляют загрязняющие вещества вниз, что приводит к значительному увеличению приземной концентрации.

При выбросе загрязненного воздуха через аэрационный фонарь отдельно стоящего здания максимальная концентрация вредных веществ в приземном слое равна:

$$c_{m\text{ф}} = \frac{0,29 k_{l\text{ф}} m_{\text{ф}}}{0,14 q_{\text{в}}^{1/3} H_{\text{зд}}^{2/3} + 2,9 k_{l\text{ф}} L},$$

где $k_{l\text{ф}}$ — коэффициент, учитывающий отношения размеров здания; $m_{\text{ф}}$ — количество вредных веществ, выбрасываемых через обе створки фонаря на 1 пог. м длины, г/м; $q_{\text{в}} = Lc_{\text{р}}(t_{\text{ух}} - t_{\text{н}})$ — количество теплоты в воздухе, уходящем через фонарь на 1 пог. м его длины, кДж/м с, L — объем воздуха, выбрасываемого через створки с обеих сторон фонаря на 1 пог. м его длины, нм³/м с; $c_{\text{р}}$ — объемная теплоемкость воздуха при постоянном давлении и нормальных условиях, кДж/(м³·град); $t_{\text{ух}}$ — температура воздуха, уходящего через фонари, °С; $t_{\text{н}}$ — температура наружного воздуха, °С. Значения $l/H_{\text{зд}}$, $k_{l\text{т}}$, $k_{l\text{ф}}$ приведены ниже:

$l/H_{зд}$ . . .	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0
$k_{lт}$	1,2	1,3	1,15	1,0	0,8	0,65	0,5	0,35	0,28	0,23
$k_{lф}$	—	0,9	1,0	1,15	1,3	1,45	1,65	1,8	2,1	2,2

Опасную скорость ветра для отдельно стоящего здания с фонарем в зоне аэродинамической тени определяют по формуле

$$v_m = 0{,}93\varphi \sqrt[3]{q_в/H_{зд}}.$$

При выбросе загрязненного воздуха через трубы, устье которых находится в зоне аэродинамической тени $H_{тр}/H_{зд}<2{,}5$, максимальные концентрации вредных веществ в приземном слое атмосферы наблюдаются на расстоянии $x_п = (3—5)\ H_{зд}$ На рис 53 представлен обобщенный график изменения концентрации по оси факела на разных относительных расстояниях $x/H_{зд}$ от заветренной стороны здания, учитывающий изменения места максимальной концентрации от отношения $H_{тр}/H_{зд}$.

При выбросе загрязненного воздуха через аэрационный фонарь наибольшая концентрация вредного вещества наблюдается на расстоянии 2,5 $H_{зд}$ от заветренной стороны здания, на заветренной стороне здания ($x=0$) она равна 60% от максимальной При $x/H_{зд}>2{,}5$ расчет концентрации по оси, перпендикулярной длинной стороне фонаря, можно проводить по формуле $c_x = c_m \exp[2{,}5—x/H_{зд}]$

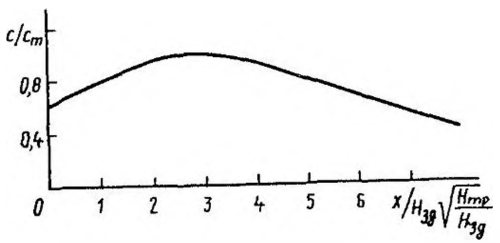

Рис. 53. График изменения относительной концентрации c/c_M по оси факела от относительного расстояния $x/H_{зд}\sqrt{H_{тр}/H_{зд}}$

Наличие последующих по потоку ветра зданий несколько увеличивает концентрации за зданием, на крыше которого расположен источник выделения вредных веществ Это увеличение при $x_{кп}/H_{зд}>1{,}0$ может быть оценено поправкой $k_{кп}=1+0{,}5\ H_{зд}/x_{кп}$, где $x_{кп}$ — расстояние между корпусами, м

Концентрации вредных веществ на расстоянии y по перпендикуляру к оси факела выброса ориентировочно можно определить по формуле $c_y=S_r c_x$. Безразмерную величину S_r определяют так же, как и для высоких труб.

Часто в практике проектирования приходится решать задачу по определению предельно допустимого выброса (ПДВ), при котором обеспечивается не превышающая ПДК смеси в приземном слое воздуха. Значения ПДВ, г/с, определяют по формулам: для случая рассеивания нагретых выбросов через одинокую незатененную трубу

$$ПДВ_{тр} = \frac{(ПДК - c_ф)\ H^2 \sqrt[3]{Q\Delta T}}{Ak_F mn},$$

для выбросов через низкую затененную трубу

$$ПДВ_{тр3} = \frac{(ПДК - c_ф)\ Dw_г H_{зд}}{0{,}53\varphi E k_{l\,г}},$$

для выбросов через фонарь

$$ПДВ_ф = \frac{(ПДК - c_ф)\left(0,14\sqrt[3]{q_в H_{зд}^2} + 2,9 k_{l ф} L\right) l_ф}{0,29 k_{l ф}},$$

где, кроме ранее обозначенных величин, $l_ф$ — длина фонаря, м. Правила установления допустимых выбросов вредных веществ промышленных предприятий регламентированы ГОСТ 17.2.3.02—78.

§ 19. САНИТАРНО-ЗАЩИТНЫЕ ЗОНЫ

Видное место в системе охраны атмосферного воздуха занимают планировочные мероприятия, позволяющие при постоянстве валовых выбросов существенно снизить воздействие загрязнения окружающей среды на человека. Особое внимание следует уделять выбору площадки для промышленного предприятия и взаимному расположению производственных зданий и жилых массивов.

Площадки для строительства промышленных предприятий и жилых массивов должны выбирать с учетом аэроклиматической характеристики и рельефа местности. Промышленный объект должен быть расположен на ровном возвышенном месте, хорошо продуваемом ветрами. Площадка жилой застройки не должна быть выше площадки предприятия, в противном случае преимущество высоких труб для рассеивания промышленных выбросов практически сводится на нет.

Взаимное расположение предприятий и населенных пунктов определяется по средней розе ветров теплого периода года. Для данной местности промышленные объекты, являющиеся источниками выделения вредных веществ в окружающую среду, располагаются за чертой населенных пунктов и с подветренной стороны от жилых массивов, чтобы выбросы уносились в сторону от жилых кварталов.

Здания и сооружения промышленных предприятий обычно размещают по ходу производственного процесса. При недостаточном расстоянии между корпусами загрязняющие вещества накапливаются в межкорпусном пространстве, которое оказывается в зоне аэродинамической тени. Расстояние между зданиями при удалении вредных веществ через аэрационные фонари в зону аэродинамической тени должно быть больше восьми высот впереди стоящего здания, если оно широкое, и больше десяти $H_{зд}$, если оно узкое. В этом случае загрязняющие вещества не будут накапливаться в межкорпусной зоне. Цехи, выделяющие наибольшее количество вредных веществ, следует располагать на краю производственной территории со стороны, противоположной жилому массиву. Кроме того, взаимное расположение цехов должно быть таким, чтобы при направлении ветров в сторону жилых кварталов их выбросы не объединялись.

Требованиями «Санитарных норм проектирования промышленных предприятий СН 245—71» предусмотрено, что объекты, являющиеся источниками выделения в окружающую среду вредных и неприятно пахнущих веществ, следует отделить от жилой застройки санитарно-защитными зонами. Размеры этих зон до границы жилой застройки устанавливают в зависимости от мощности предприятия, условий осуществления технологического процесса, характера и количества выделяемых в окружающую среду вредных и неприятно пахнущих веществ. В соответствии с классификацией промышленных предприятий в зависимости от выделяемых вредностей установлено пять санитарно-защитных зон; для предприятий I класса — 1000 м; II класса — 500 м; III класса — 300 м; IV класса — 100 м; V — класса — 50 м.

Предприятия с технологическими процессами, не выделяющими в атмосферу вредных веществ, допускается размещать в пределах жилых районов. Машиностроительные предприятия по степени воздействия на окружающую среду в основном относятся к IV и V классам.

При наличии неблагоприятных аэрологических условий для рассеивания производственных выбросов в атмосфере, при отсутствии или недостаточной эффективности очистных устройств санитарно-защитная зона может быть увеличена, но не более чем в 3 раза по совместному решению Главного санитарно-эпидемиологического управления Минздрава СССР и Госстроя СССР.

Размеры санитарно-защитной зоны могут быть уменьшены при изменении технологии, совершенствовании технологического процесса и внедрении высокоэффективных и надежных в эксплуатации очистных устройств.

Санитарно-защитную зону нельзя рассматривать как резервную территорию предприятия и использовать ее для расширения промышленной площадки. Вместе с тем на территории санитарно-защитной зоны допускается размещать объекты более низкого класса вредности, чем основное производство, для которого установлена эта зона, а также пожарное депо, гаражи, склады, административные здания, научно-исследовательские лаборатории, стоянки транспорта и т. п.

Для максимального ослабления влияния на окружающее население производственных загрязнений атмосферного воздуха территория санитарно-защитной зоны должна быть благоустроена и озеленена газоустойчивыми породами деревьев и кустарников. Со стороны жилого массива ширина полосы древесно-кустарниковых насаждений должна быть не менее 50 м, а при ширине зоны до 100 м — не менее 20 м. При прохождении промышленных выбросов через озелененную зону разрыва концентрация содержащихся в них пыли и газов должна уменьшиться вдвое.

Недостаточно продуманная система посадки зеленых насаждений может привести к отрицательному эффекту. Создание сплошно-

го лесного массива в санитарно-защитной зоне при низких источниках выброса вредных веществ, с одной стороны, максимально уменьшает опасность неблагоприятного воздействия предприятия на население, а с другой — в определенных случаях может способствовать возникновению застоя и росту концентраций вредных веществ на самой промышленной площадке в связи с ухудшением естественного проветривания территории.

§ 20. МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ И ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ПЫЛЕ- И ГАЗООБРАЗНЫХ ПРИМЕСЕЙ В АТМОСФЕРЕ

Интервал возможных концентраций загрязнений может изменяться от 10^{-8} до 10^{5} мг/м^3, а полидисперсные системы характеризуются, как правило, еще и широким спектром размеров частиц от 10^{-2} до 10^{3} мкм. Это исключает возможность создания универсального метода измерения концентраций атмосферного загрязнения и объясняет дифференцированный подход к способам их измерения.

Независимо от используемого метода анализа контроль концентраций вредных примесей сводится к следующим операциям: отбор проб воздуха, подготовка пробы к анализу, анализ и обработка результатов.

Наиболее ответственным этапом при определении концентрации вредных примесей является представительный отбор проб воздуха, обеспечивающий достоверность результатов. Самым простым и распространенным способом накопления газовой или пылевой пробы является протягивание воздуха воздуходувными устройствами (аспиратор, эжектор, насос) с определенной скоростью, регистрируемой расходомерным устройством (реометр, ротаметр, газовые часы), через накопительные элементы, обладающие необходимой поглотительной способностью.

Отбор проб воздуха, содержащего твердые и жидкие аэрозоли, проводят либо методом фильтрации, либо при использовании центробежных, инерционных и электростатических сил, либо методом термодиффузии.

Метод фильтрации позволяет выделить частицы размером свыше 0,1 мкм. Этот метод основан на пропускании через фильтр определенного объема исследуемого воздуха при помощи аспирационного устройства. В качестве фильтрующих материалов в отечественных пылемерах применяют аналитические аэрозольные фильтры (АФА) на базе тканей ФПП-15, ФПМ-15 и др. Фильтры изготавливают с рабочей поверхностью круглого сечения диаметром 10, 18, 40, 100 и 160 мм. Выделение взвешенных частиц под действием сил инерции осуществляется в импакторах, что применимо для частиц размером более 0,5 мкм. Метод центробежного осаждения взвешенных частиц пыли осуществляется в циклоне и позволяет выделить крупные частицы размером более 1 мкм. Методы термодиффу-

зии и электростатического осаждения позволяют выделить частицы размером свыше 0,01 мкм.

Отбор проб воздуха при анализе газо- и парообразных примесей осуществляется за счет протягивания воздуха через специальные твердые или жидкие поглотители, в которых газовая примесь конденсируется либо адсорбируется. В последние годы в качестве сорбентов для концентрирования микропримесей используют растворимые неорганические хемосорбенты, пленочные и полимерные сорбенты (полисорбы, порапаки, тенаке и др.), позволяющие улавливать из загрязненного воздуха самые различные химические вещества. Важным достоинством полимерных сорбентов являются их гидрофобность (влага воздуха не концентрируется в ловушке и не мешает анализу) и способность сохранять в течение длительного времени без изменения первоначальный состав пробы.

Для контроля запыленности часто используют гравиметрический (весовой) метод, который заключается в выделении частиц пыли из пылегазового потока и определении их массы. Концентрацию пыли рассчитывают по формуле

$$c = m/Q\tau,$$

где m — масса пробы пыли, мг; Q — объемный расход воздуха через пробоотборник, $м^3/с$; τ — время отбора проб, с.

Основные преимущества этого метода — получение массовой концентрации пыли и отсутствие влияния ее химического и дисперсного состава на результаты измерений. Однако метод отличается большой трудоемкостью и длительностью процесса измерения.

Для измерения концентрации промышленной пыли применяют также радиоизотопный и оптический метод.

Контроль концентраций газо- и парообразных примесей атмосферного воздуха производится с помощью газоанализаторов, позволяющих осуществлять мгновенный и непрерывный контроль содержания в нем вредных примесей. Для экспрессного определения токсичных веществ используют универсальные газоанализаторы упрощенного типа (УГ-2, ГХ-2 и др.), основанные на линейно-колористическом методе анализа. При просасывании воздуха через индикаторные трубки, заполненные твердым веществом-поглотителем, происходит изменение окраски индикаторного порошка. Длина окрашенного слоя пропорциональна концентрации исследуемого вещества, измеряемой по шкале в мг/л. Универсальный газовый анализатор УГ-2, серийно выпускаемый отечественной промышленностью, позволяет определить концентрацию 16 различных газов и паров. Погрешность измерения не превышает $\pm 10\%$ от верхнего предела каждой шкалы.

Выбор метода анализа загрязненного воздуха определяется природой примесей, а также ожидаемой концентрацией и целью анализа [34].

Для регистрации выбросов промышленных предприятий, а также исследования загрязнений атмосферы применяют лазерные методы, в которых учитывается рассеивание излучения лазера частицами аэрозолей и молекулами газов. Рассеянная энергия попадает на приемную антенну локатора. Регистрируя и расшифровывая следы взаимодействия лазерных импульсов с атмосферными слоями, можно извлечь информацию о давлении, плотности, температуре, концентрации различных газовых составляющих атмосферы и других параметрах.

Создание лазеров большой мощности с узким и стабильным спектром излучения, с полностью автоматизированным циклом работ и передачей результатов в вычислительный центр, совершенствование методов извлечения информации из результатов зондирования позволяют осуществлять оперативный контроль степени загрязнения атмосферы в широких масштабах.

Наиболее распространенные модели приборов для измерения концентраций пыли и газообразных примесей в атмосферном воздухе приведены в табл. 43.

Таблица 43

Тип прибора	Метод измерения	Определяемое вещество	Измеряемая концентрация, мг/м³	Погрешность, %
ППА	Гравитационный (фильтрация)	Аэрозоль	Свыше 1,0	±20
ПРИЗ	Радиоизотопный (β-излучение)	»	1—500	±15
ФЭКП	Ленточный фотометр	»	0—4000	±20
АЗ-5	Счетчик частиц (регистрация рассеянного света)	»	1—300	±20
ФЭН-90	Нефелометрический	»	0—300	±5,0
КДМ-1	Пьезоэлектрический	»	0—100	±8,0
ОА-5501	Оптико-акустический	»	0—4000	±5,0
ФЛ-5601	Фотоколориметрический	CO, CH_4, CO_2	0—20	±10
«Атмосфера»	Электрохимический	SO_2, NH_3, NO_2, H_2S	0—15 000	—
КУ-3	Кондуктометрический	CO, CO_2, пары бензина	0—500	±5,0
8440	Хемилюминесцентный	NO_x	0—5	±3,0
ГПН-А	Пламенно-ионизационный	Углеводороды	0—5	±1,0
ГАИ-1	Оптико-абсорбционный	CO	0—10%	±5
ГАИ-2	То же	CO, CO_2	0—5%	±4
121ФА-01	Инфракрасный абсорбционный	CO	0—5%	±4

Контрольные вопросы

1. По каким физическим механизмам работают пылеулавливающие устройства?

2. Как изменяется эффективность очистки циклонов при изменении входной скорости, плотности и диаметра частиц, диаметра циклона?

3. Каковы достоинства и недостатки мокрых пылеуловителей по сравнению с сухими? Где рационально использовать мокрые пылеуловители?

4 Какова роль электрического сопротивления улавливаемых частиц, площади поверхности осадительных электродов и скорости газа в работе электрофильтров?

5. Перечислите условия, обусловливающие целесообразность применения тканевых фильтров, электрофильтров, скрубберов, аппаратов инерционного действия

6. В каких случаях рекомендуется применять многоступенчатую очистку и почему?

7. Назовите основные типы адсорбентов и схемы абсорберов, применяемых в газоочистных установках

8. Назовите область применения физических (абсорбция и адсорбция) и химических (термическое и каталитическое дожигание) методов очистки от газообразных примесей

9. Если токсичность выбросов дизелей существенно ниже выбросов бензиновых ДВС, то почему дизели не применяются широко в автомобилях?

10. Какие проблемы возникают при эксплуатации каталитических реакторов (нейтрализаторов)?

11. Назовите три основных механизма, способствующих рассеянию вредных выбросов в атмосфере.