

# **Рациональное использование воздуха (газоочистка)**

**«Всё, что попадает в воздух,  
рано или поздно возвращается  
на землю, чтобы принять  
участие в природных  
процессах, происходящих в  
почве и воде».**

**Барри Коммонер,  
Замыкающийся круг**

## Виды загрязнений окружающей среды

### ЗАГРЯЗНЕНИЕ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

```
graph TD; A[ЗАГРЯЗНЕНИЕ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ] --> B[ФИЗИЧЕСКОЕ]; A --> C[ХИМИЧЕСКОЕ]; A --> D[БИОЛОГИЧЕСКОЕ]; B --> B1[• Механическое]; B --> B2[• Тепловое]; B --> B3[• Шумовое]; B --> B4[• Радиоактивное]; B --> B5[• Электромагнитное]; C --> C1[• Пестициды]; C --> C2[• Аэрозоли]; C --> C3[• Химические вещества]; C --> C4[• Тяжелые металлы]; C --> C5[• Пластмассы]; D --> D1[• Биогенное]; D --> D2[• Микробиологическое];
```

#### ФИЗИЧЕСКОЕ

- Механическое
- Тепловое
- Шумовое
- Радиоактивное
- Электромагнитное

#### ХИМИЧЕСКОЕ

- Пестициды
- Аэрозоли
- Химические вещества
- Тяжелые металлы
- Пластмассы

#### БИОЛОГИЧЕСКОЕ

- Биогенное
- Микробиологическое

# ИСТОЧНИКИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ

```
graph TD; A[ИСТОЧНИКИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ] --> B[Естественные (природные)]; A --> C[Искусственные (антропогенные)]; B --> B1[• пыльные бури]; B --> B2[• вулканизм]; B --> B3[• лесные пожары]; B --> B4[• выветривание]; B --> B5[• разложение земных организмов]; C --> C1[• промышленные предприятия]; C --> C2[• транспорт]; C --> C3[• теплоэнергетика]; C --> C4[• отопление жилищ]; C --> C5[• сельское хозяйство];
```

## Естественные (природные)

- пыльные бури
- вулканизм
- лесные пожары
- выветривание
- разложение земных организмов

## Искусственные (антропогенные)

- промышленные предприятия
- транспорт
- теплоэнергетика
- отопление жилищ
- сельское хозяйство

# Ниже представлен вклад (%) в загрязнение атмосферного воздуха основных отраслей промышленности:

Электроэнергетика	28,5
Цветная металлургия	21,6
Черная металлургия	15,2
Нефтедобыча	7,9
Нефтепереработка	5,1
Машиностроение	3,6
Угольная промышленность	3,6
Газовая промышленность	3,3
Производство строительных материалов	3,2
Химическая промышленность	2,7
Деревообработка	2,6
Пищевая промышленность	1,5
Оборонная промышленность	0,6
Легкая промышленность	0,4

# Источники образования загрязняющих веществ и источники загрязнения воздушной среды.

## Источники выброса

1. К источникам образования загрязняющих веществ относится любое технологическое оборудование, порождающее вредные компоненты, которые потенциально способны переместиться в атмосферу.

2. Источники загрязнения воздушной среды разделяют на источники выделения примесей в воздух помещения и источники выброса примесей в атмосферу.

# источники загрязнения атмосферы

По происхождению:

*технологические* - состоят из хвостовых газов после улавливания на установках, продувание аппаратуры и воздушных вытяжек;

*вентиляционные выбросы* - местные выбросы от оборудования.

# ИСТОЧНИКИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ

## по месту расположения:

*не заниженные*, или *высокие*, которые находятся в зоне воздушного недеформированного потока;

*заниженные*, или *низкие* - расположенные на высоте в 2.5 раза ниже высоты строения; *надземные*, размещенные близко к земной поверхности;

## по геометрической форме: *точечные, линейные;*

по режиму работы: *бесперывные, периодического действия.*

# Источники выбросов примесей

## Организованные

Выброс поступает в атмосферу в виде компактного направленного потока через специально сооруженные вентиляционные системы или их элементы.

## Неорганизованные.

Выброс поступает в атмосферу в виде ненаправленных потоков в результате нарушения герметичности зданий, сооружений, установок, а также отсутствия вентиляционных систем.

## Распределенные.

Выбросы в основном связаны с автотранспортом и авиацией.

Значительной мерой загрязняют атмосферу самолеты. Так, выбросы четырех моторного реактивного самолета на взлете с полной нагрузкой эквивалента выброса 6850 автомобилей марки "Фольксваген".



Мероприятия по снижению выбросов

Совершенствование технологических процессов

Снижение неорганизованных выбросов

Строительство новых и повышение эффективности существующих очистных устройств

Ликвидация источников загрязнения

Перепрофилирование производства

# ВЫБРОСЫ В АТМОСФЕРУ



# Способы выражения концентрации примесей в воздухе

Объемная доля –  $a$

$$a = v / V,$$

где  $v$  – объем примеси,  $V$  – объем газа, в котором она находится.

$$\% \text{ об.} = a * 100$$

$$\text{ppm} = \text{млн}^{-1} = a * 10^6$$

$$\text{ppb} = \text{млрд}^{-1} = a * 10^9$$

# Количество молекул в каждом кубическом сантиметре воздуха

$$N_0 \text{ (Молекул /см}^3 \text{)} = N \text{ см}^{-3}$$

При нормальных условиях

( $T_0 = 273^\circ\text{К}$ ,  $P_0 = 1 \text{ атм.} = 101,3 \text{ кПа} = 760 \text{ мм.рт. ст.}$ )

$$N_0 = 6,02 \cdot 10^{23} / 22,4 \cdot 10^3 = 2,69 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$$

При других условиях

$$N_i = N_0 \cdot T_0 \cdot P_i / T_i \cdot P_0$$

$$n_{ji} = N_i \cdot a_j$$

# Весовая концентрация примесей в воздухе

При оценке качества воздуха часто выражают концентрацию примесей в единицах массы на единицу объема.

При оценке санитарного состояния воздуха, в нашей стране, принято выражать концентрацию примесей в количестве мг примеси в каждом куб.м. воздуха

$$\text{мг/ м}^3$$

Такое выражение концентрации используется для любого агрегатного состояния примесей газов, паров, капельно-жидкого состояния, твердых веществ.

В стандартных условиях

$$C (\text{мг/ м}^3) = C (\text{ppm}) * M (\text{г/моль.}) / 22,4(\text{л})$$

## Задача.

Превышается ли и, если да, то во сколько раз, предельно допустимая максимально разовая концентрация для аммиака, равная  $0,2 \text{ мг/м}^3$ ,

при обнаружении его запаха. Если порог запаха для аммиака, по данным зарубежных специалистов, составляет  $46,6 \text{ ppm}$ .

Давление воздуха равно  $101,3 \text{ кПа}$ , температура  $25^{\circ} \text{ С}$ .

## Задача 2.

Сколько молекул аммиака присутствует в каждом кубическом сантиметре воздуха при обнаружении его запаха?

Порог запаха для аммиака составляет  
46,6 ppm.

Давление воздуха равно 740 мм.рт.ст.,  
температура  $18^{\circ}\text{C}$ .

# Аэрозоли в атмосфере

Аэрозолями называют дисперсные системы, содержащие твердые или жидкие частицы, суспендированные в газовой фазе.

Твердая фаза представляет собой продукты конверсии примесей, либо частицы золы и минеральной пыли.

Жидкая фаза состоит из воды, продуктов превращения примесей и растворимых компонентов.



# Аэрозоли в атмосфере

Твердая фаза представляет собой продукты конверсии примесей, либо частицы золы и минеральной пыли.

Жидкая фаза состоит из воды, продуктов превращения примесей и растворимых компонентов.

Превращения примесей сопровождаются постоянным взаимодействием между газовой, жидкой и твердой фазами, присутствующими в тропосфере.

Химические реакции, протекающие в этих сложных системах, часто называют гетерогенными химическими реакциями.

## Критерии устойчивости аэрозольных частиц

Для существования устойчивого аэрозоля (аэродисперсной системы) необходимы следующие условия:

- 1) скорость седиментации частиц мала;
- 2) силами инерции при перемещении частиц можно пренебречь (отношение сил инерции к силам вязкости мало);
- 3) броуновское движение частиц весьма эффективно;
- 4) система характеризуется высокой удельной поверхностью.

$$W = 2 \cdot r^2 \cdot \rho \cdot g / 9\mu$$

где  $r$  и  $\rho$  – радиус и плотность частицы (в сферическом приближении);

$\mu$  - динамическая вязкость газа ( $1,81 \cdot 10^{-4}$  Па·с, 298 К);

$g$  - ускорение свободного падения.

В атмосфере  $W$  зависит от высоты над уровнем моря. Более того, в тропосфере восходящие потоки еще больше затрудняют интерпретацию понятия  $W$ .

### Задача

Определите размер частицы для устойчивого аэрозоля, если в качестве верхнего предела  $W$  принять значение  $0,1 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ , при  $\rho = 1 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$ .

# Поступление частиц из различных источников в атмосферу (млн. т. в год)

Вид частиц	Природные источники	Смешанные источники	Антропогенные источники
<b>Прямые эмиссии частиц антропогенного происхождения</b>	-	-	<b>10-90</b>
<b>Частицы, образующиеся из углеводородов (антропог.)</b>	-	-	<b>15-90</b>
<b>Лесные пожары и подсечно-огневое земледелие</b>	-	<b>3-150</b>	-
<b>Вулканы</b>	<b>25-150</b>	-	-
<b>Углеводороды из растений</b>	<b>75-200</b>	-	-
<b>Сульфаты из SO<sub>2</sub></b>	-	-	<b>130-200</b>
<b>Морская соль</b>	<b>300</b>	-	-
<b>Аммонийные соли</b>	-	<b>80-270</b>	-
<b>Нитраты из NO<sub>x</sub></b>	<b>30-35</b>	-	-
<b>Дезинтеграция почвы и скальных пород</b>	-	<b>100-500</b>	-

Сколько аэрозольных частиц присутствует в каждом кубическом сантиметре воздуха при концентрации, равной  $\text{ПДК}_{\text{р.з.}} = 6 \text{ мг. куб. м.}$

Плотность частицы принять равной  $1 \text{ г/см}^3$

Диаметр частиц  $1 \text{ мкм.}$

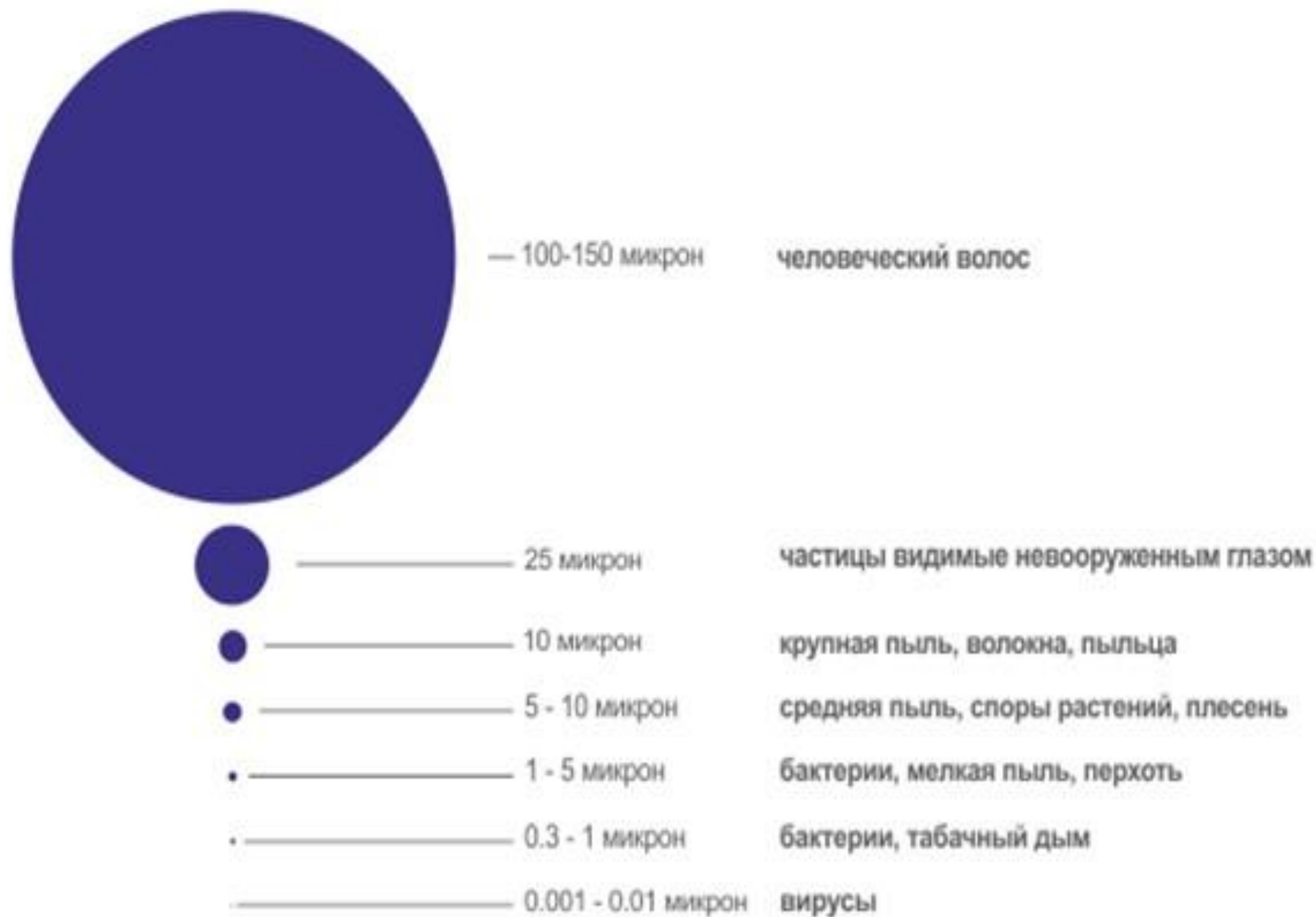
# Аэрозоли в атмосфере

По типу происхождения и по размерам аэрозоли обычно подразделяют на две большие группы:

микро- и макрочастицы.

Микрочастицы радиуса меньше 0,5 -1,0 мкм образуются в процессах коагуляции и конденсации.

Макрочастицы возникают в основном при дезинтеграции поверхности Земли.



# Крупные частицы — больше чем 100 микрон.

- Быстро падают из воздуха (оседают на пол и горизонтальные поверхности)
- включает волосы, снег, грязь от насекомых, комнатную пыль, скопление сажи, крупный песок
- Могут попасть в нос и рот в процессе дыхания. Эффективно задерживаются в дыхательных путях и бронхах, не проникая в легкие. Опасны в очень больших концентрациях, увеличивают нагрузку на дыхательные пути, могут вызывать рак, аллергические реакции.
- Задерживаются обычными фильтрами грубой очистки.



# Средний размер частиц — в пределах до 10 микрон.

- Относятся к  $PM_{10}$  по принятой классификации размеров частиц.
- Медленно падают из воздуха (оседают на пол и горизонтальные поверхности)
- Это - цветочная пыльца, большие бактерии, частицы золы в воздухе, угольную пыль, мелкий песок, и мелкая пыль
- Частицы, которые через дыхательные пути попадают в легкие, но не попадают в зону газообмена и не всасываются в кровь. Зашлаковывают легкие, могут вызывать рак, астму, аллергические реакции.
- Задерживаются фильтрами тонкой очистки.

## **Мелкие частицы — менее 1 микрона**

Относятся к  $PM_1$  по принятой классификации размеров частиц.

Очень медленно падают из воздуха (оседают на пол и горизонтальные поверхности).

В спокойной атмосфере процесс может занять от дней до годов для оседания. В возмущенной атмосфере они могут никогда не осесть.

Включает вирусы, мелкие бактерии, металлургическую копоть, сажу, пары масла, табачный дым, копоть.

Эти частицы проникают в зону легких, отвечающую за газообмен.

Через альвеолы могут всасываться в кровь, вызывая зашлаковывание сердечно-сосудистой системы, аллергические реакции, интоксикацию адсорбированными на поверхности частиц химическими соединениями.

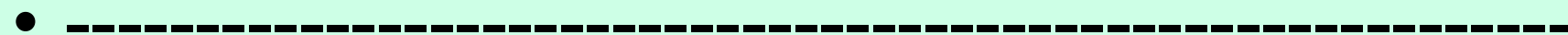
Задерживаются фильтрами высокой эффективности.

# Классификация частиц по размерам

- Ядра Айткена                      менее 0,1 мкм
- Большие частицы            от 0,1 до 1 мкм
- Гигантские частицы            более 1 мкм

# Концентрация аэрозолей (см<sup>-3</sup>)

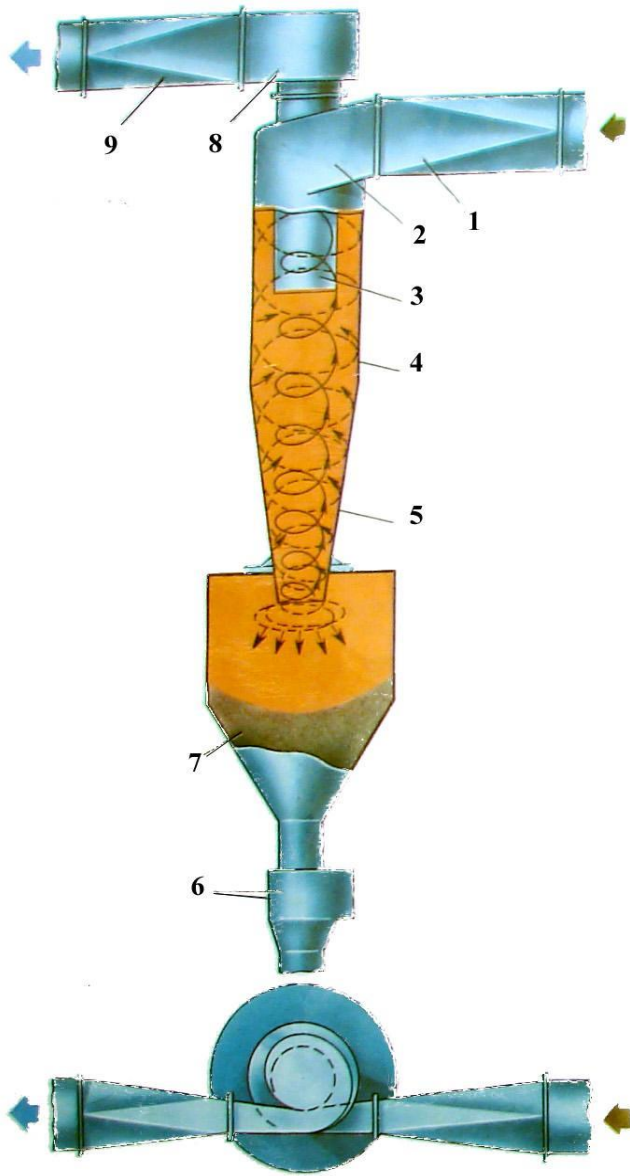
- Антарктида 100 -1000
- Природные территории 1000 – 10000
- Городской воздух 10000000



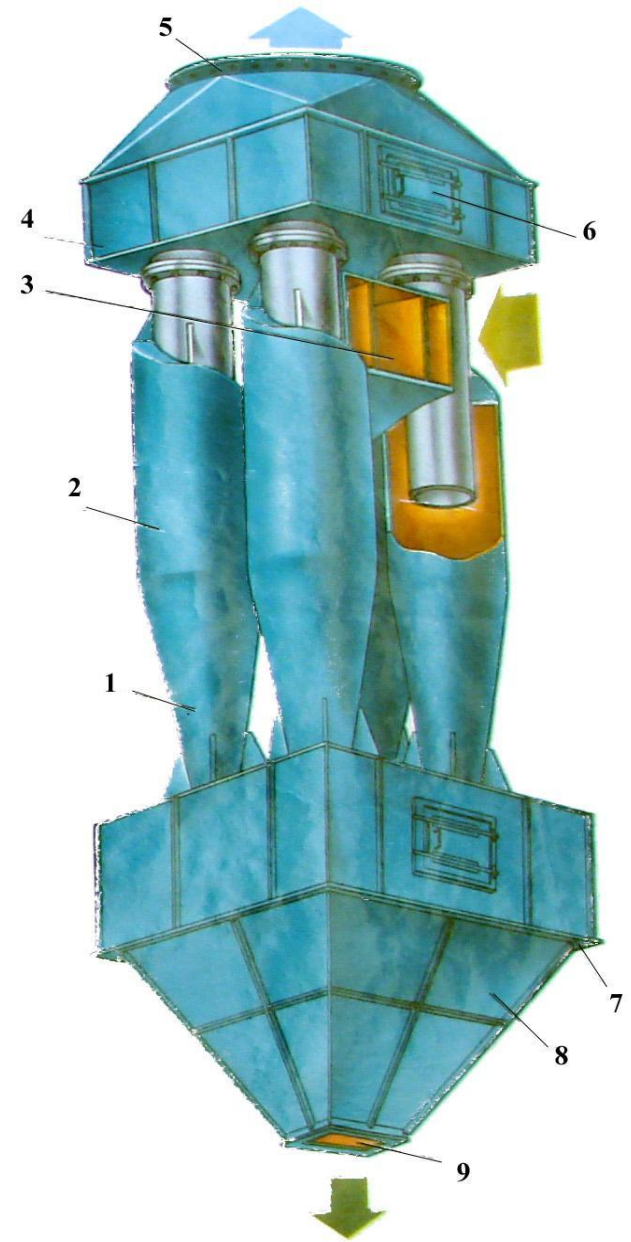
	Ядра Айткена	Большие	Гигантские
• N (см <sup>-3</sup> )	10 <sup>5</sup>	100	1
• N (мкг/м <sup>3</sup> )	40	20	20

## Зависимость эффективности улавливания от фракционного состава твёрдых частиц и аэрозолей в газовом потоке для различных типов оборудования

Тип оборудования	Общая эффективность, %	Эффективность улавливания, %				
		<5 мкм	5-10 мкм	10-20 мкм	20-40 мкм	>40 мкм
Пылеосади-тельная камера	58,6	7,5	22	43	80	90
Обычный циклон	65,3	12	33	57	82	91
Циклон с удлинённым конусом	84,2	40	79	92	95	97
Электрофильтр	97,0	72	94,5	97	99,5	100
Полый скруббер, орошаемый водой	98,5	90	96	98	100	100
Скруббер Вентури	99,5	99	99,5	100	100	100
Рукавный фильтр	99,7	99,5	100	100	100	100



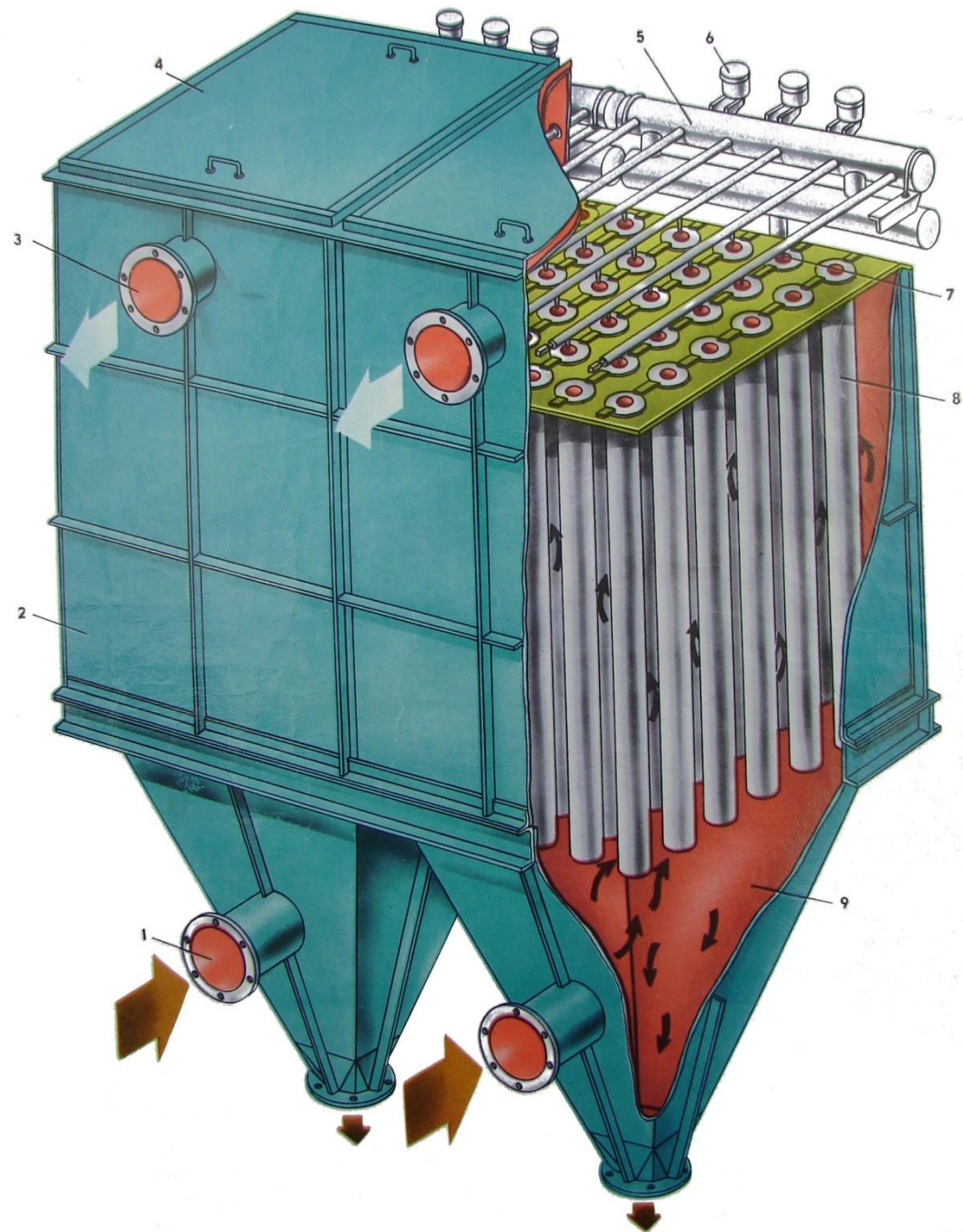
**a**

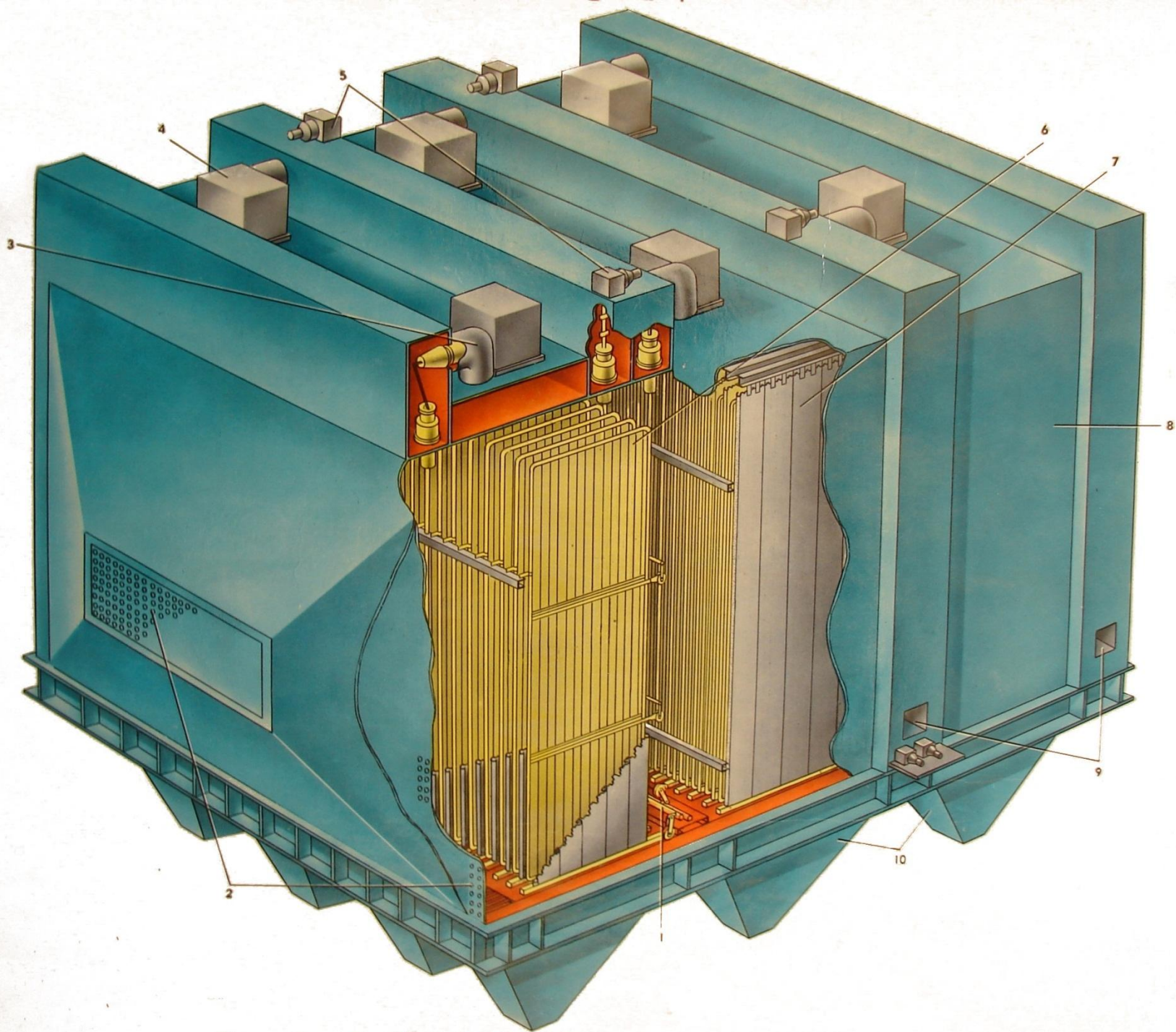


**б**

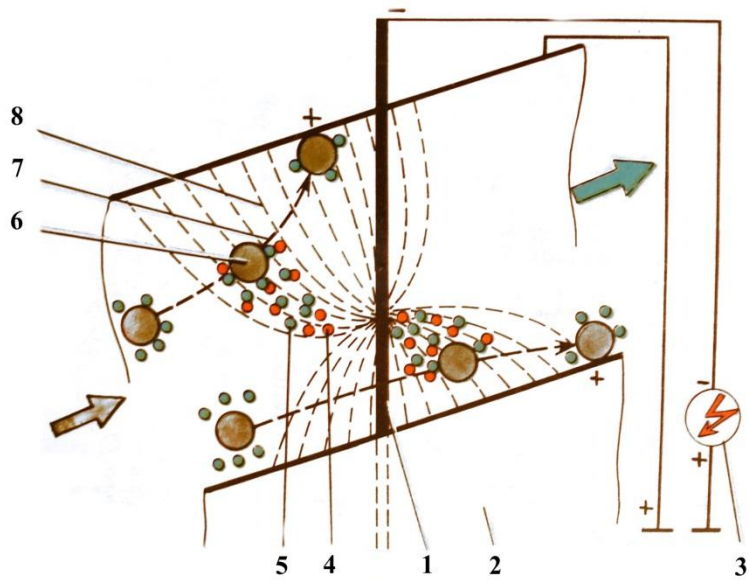


**Схема работы рукавного фильтра:**  
**а – очистка от пыли,**  
**б – регенерация фильтра сжатым воздухом.**

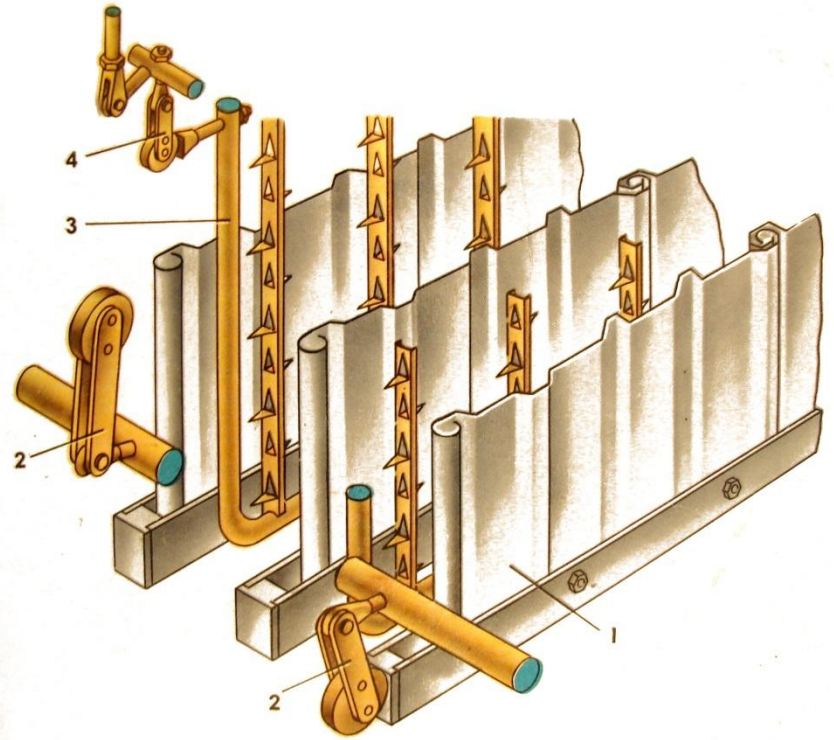








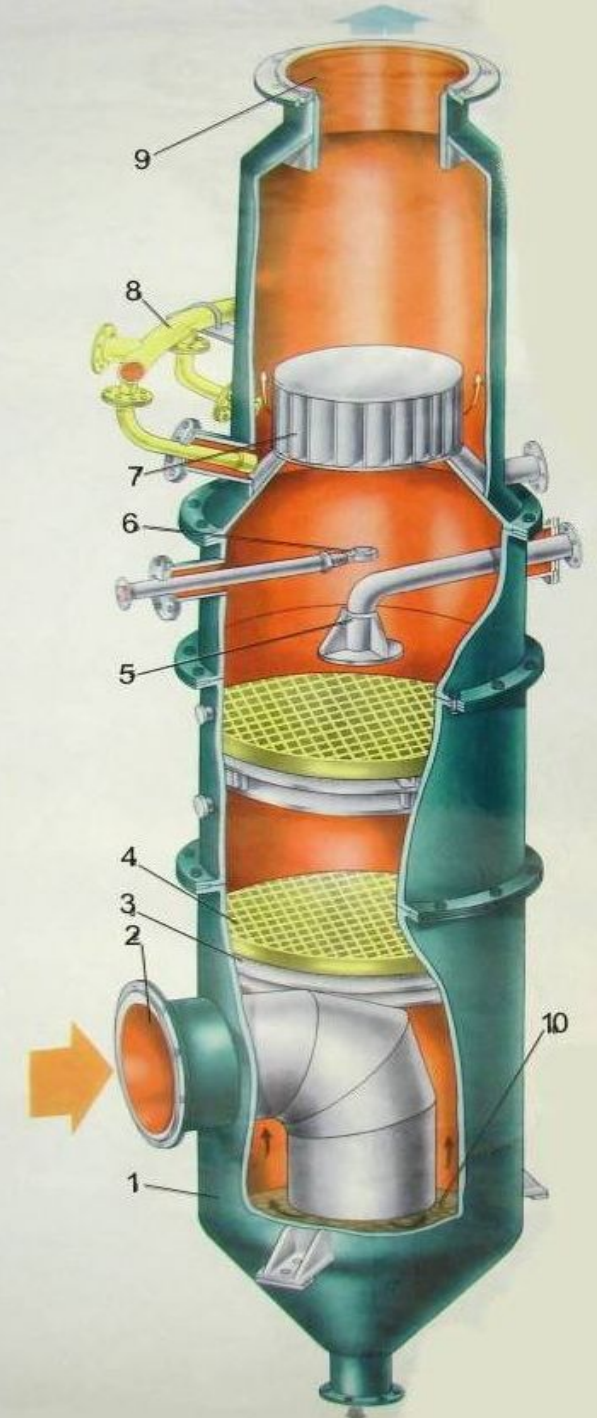
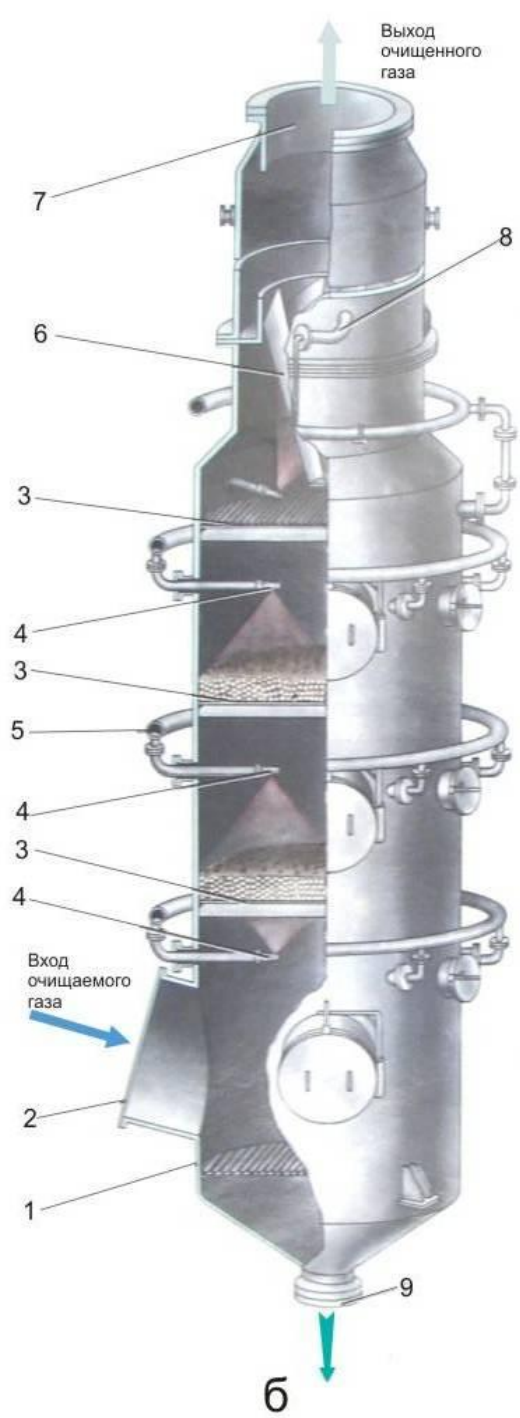
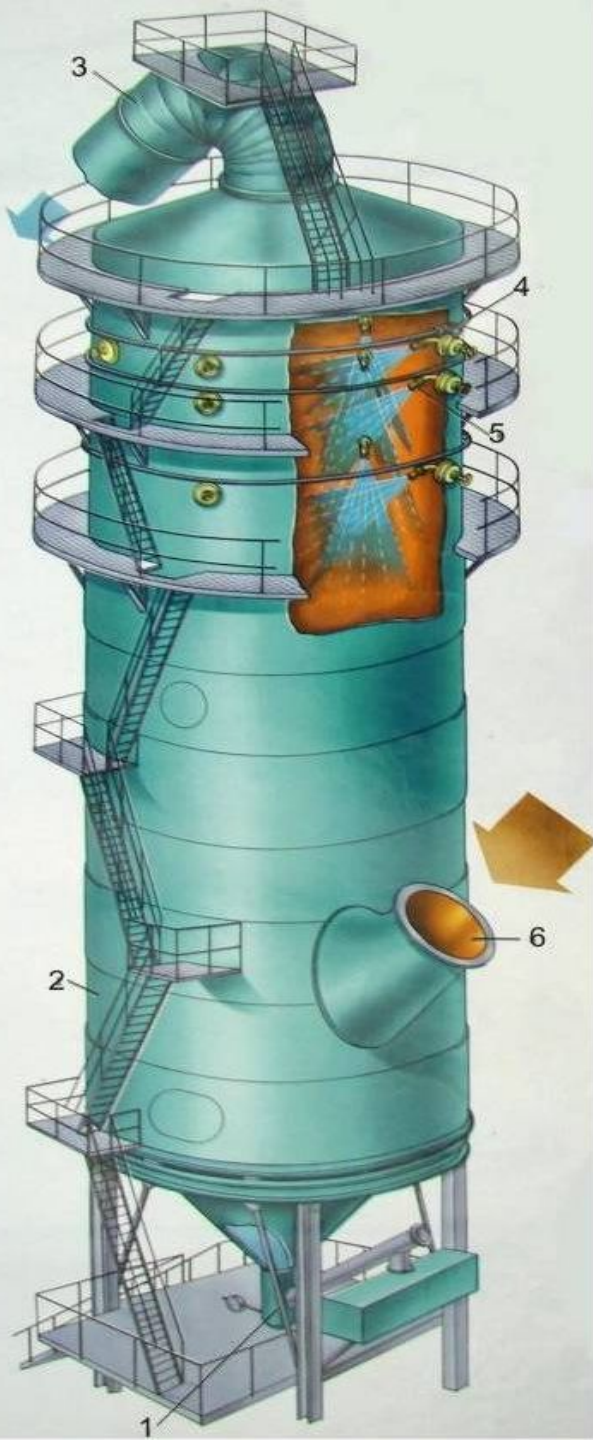
**a**



**b**

# Скруббер





# Очистка от газообразных примесей

## Абсорбционные методы.

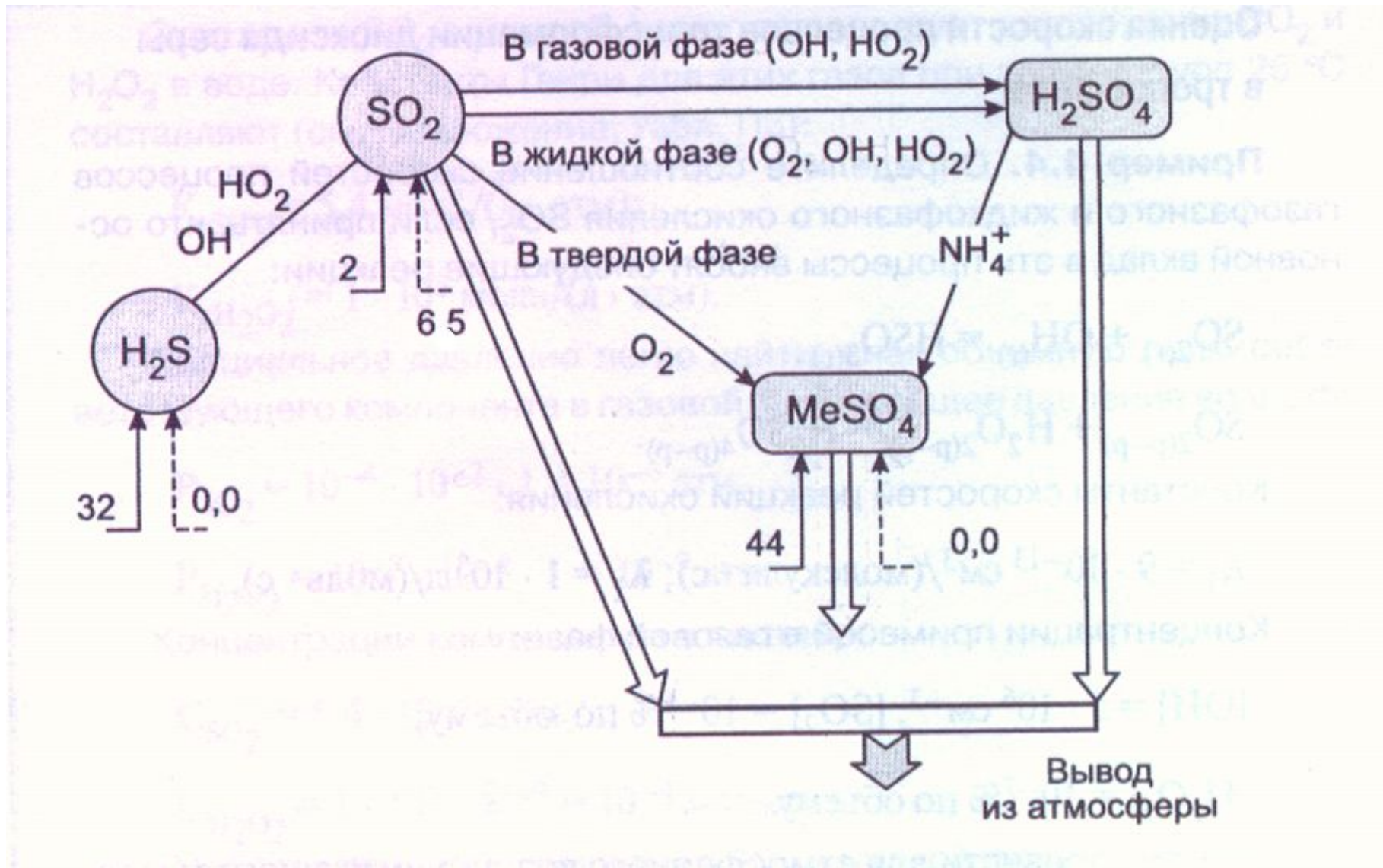
Основаны на поглощении газов водными растворами, суспензиями или органическими жидкостями.

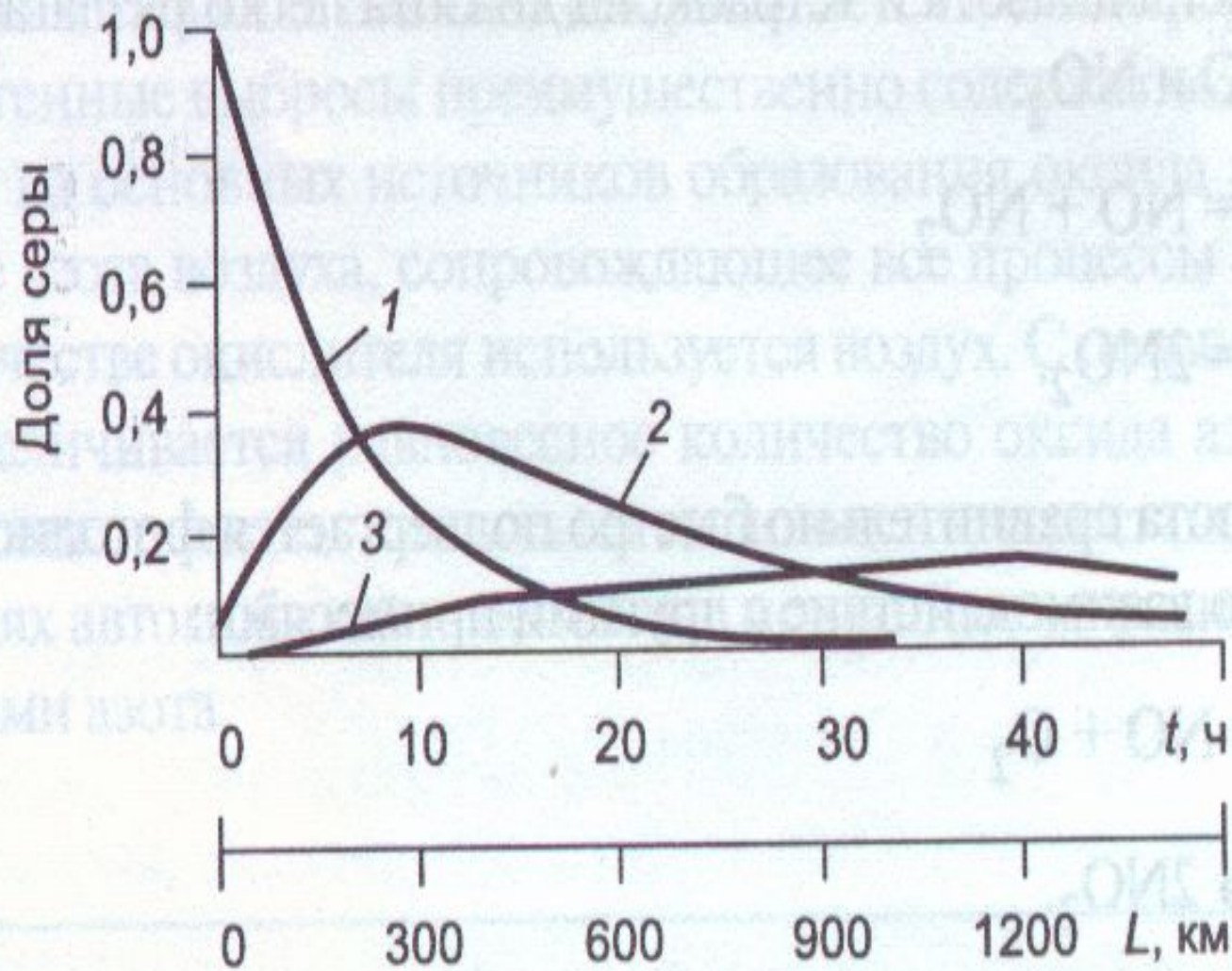
# **Очистка от газообразных примесей**

**Адсорбционные методы.**

**Основаны на поглощении газовых  
примесей твердыми сорбентами**

# Схема трансформации соединений серы в тропосфере





Зависимость долей серы, представленной в тропосфере в виде диоксида (1), серной кислоты (2) и сульфатов (3), от времени пребывания в атмосфере  $t$  и удаленности от точечного источника выброса  $L$  при скорости ветра 30 км/ч

## Антропогенные источники серы

В природе нет ископаемого топлива, которое состояло бы из одних углеводородов. Всегда имеется примесь других элементов, и один из них — сера.

Даже природный газ содержит по крайней мере следы серы.

В сырой нефти, в зависимости от месторождения, содержится от 0,1 до 5,5 процента серы;

уголь содержит от

0,2 до 7 процентов серы.

Сжигание топлива дает 80—90 % всего антропогенного сернистого газа,

причем больше всего (70 процентов и более) дает сжигание угля.

10—20 процентов приходится на выплавку цветных металлов и производство серной кислоты.



## **Антропогенные источники серы**

Сырьем для получения меди, свинца и цинка служат главным образом руды, содержащие большое количество серы (до 45 процентов).

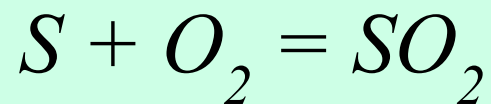
Эти руды и другие богатые серой минералы служат сырьем для получения серной кислоты.

# *Оценка масштабов антропогенных поступлений соединений серы и азота в атмосферу*

*Оцените мольное отношение и общую массу диоксида серы и оксидов азота, поступающих в атмосферу в течение суток с выбросами тепловой электростанции, работающей на угле. Содержание серы в угле равно 1,5%. В сутки на станции сжигается 10 тыс. т угля. Концентрация оксидов азота в газовых выбросах составляет  $150 \text{ млн}^{-1}$ . Для сжигания угля используется стехиометрически необходимое количество воздуха. При оценке принять, что уголь состоит из углерода и содержит в качестве примеси только серу.*

# Решение

*Появление диоксида серы в выбросах отходящих газов при сжигании топлива связано с процессом окисления соединений серы, присутствующих в исходном топливе. В рассматриваемом случае процесс можно представить уравнением:*



*Количество серы, сжигаемое на станции за сутки, составит:*

$$m(S) = M(\text{угля}) * \alpha(S),$$

*где:  $m(S)$  и  $M(\text{угля})$  - масса серы и угля сжигаемого на станции в сутки;*

*$\alpha(S)$  - массовая доля серы в угле.*

**Количество молей диоксида серы, образующегося в процессе горения угля, равно количеству молей серы, содержащейся в угле, составит:**

$$N(\text{SO}_2) = N(\text{S}) = m(\text{S}) / M.M.(\text{S})$$

**где  $M.M.(\text{S})$  - масса моля серы.**

$$m(S) = 10000 * 0,015 = 150$$

*(т/сутки)*

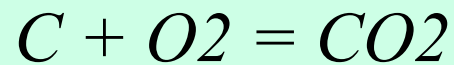
$$N(\text{SO}_2) = 150 * 10^6 / 32 = 4,69 * 10^6 \text{ (молей/сутки)}$$

Для вычисления количества молей оксида азота, образующегося в процессе горения угля, необходимо найти общее количество молей газов, содержащееся в отходящих продуктах (Nоб.).

Эта величина будет определяться количеством молей азота, содержащегося в воздухе, необходимом для окисления углерода и серы из угля ( $N_{N_2}$ ),

количеством молей диоксида углерода, образующегося при горении углерода ( $N_{CO_2}$ ),

Процесс окисления углерода можно представить уравнением:



Каждые сутки на станции сжигается 10000 т угля, которые, по условию задачи, содержат 150 т серы и 9850 т углерода.

Количество молей углерода, сжигаемого на станции в сутки, составит:

$$N(C) = m(C) / M(C)$$



На каждый моль углерода образуется моль диоксида углерода и расходуется, как и при окислении серы, один моль кислорода из воздуха.

Поэтому количество молей диоксида углерода, образовавшегося в процессе горения угля, составит:

$$N_{CO_2} = N(C)$$

*Общее количество молей кислорода,  
необходимое для окисления серы и углерода,  
содержащихся в угле, составит:*

$$N(O_2) = N(O_2 \text{ на окисление серы}) + N(O_2 \text{ на окисление углерода})$$

$$N(C) = 9850 * 10^6 / 12 = 8,21 * 10^8 \text{ молей/сутки}$$

$$NCO_2 = N(C) = 8,21 * 10^8 \text{ молей/сутки}$$

$$N(O_2) = 4,69 * 10^6 + 8,21 * 10^8 = 8,26 * 10^8 \text{ молей/сутки}$$

Поскольку в процессе сжигания угля используется воздух, кислород из которого, по условию задачи, будет полностью израсходован на окисление серы и углерода, в отходящих газах останется лишь азот, если не принимать во внимание другие инертные газы и процесс окисления самого азота. Содержание азота можно определить, зная средний состав воздуха:

$$N_{N_2} = N_{(O_2)} * \alpha(N_2) / \alpha(O_2),$$

где  $\alpha(N_2)$  и  $\alpha(O_2)$  – содержание азота и кислорода в воздухе

$$NN_2 = 8,26 * 10^8 * 78,11 / 20,95 = 3,08 * 10^8 \text{ молей/сутки}$$

*Общее количество молей газов, содержащихся в*

*отходящих продуктах сжигания угля, составит:*

$$N (\text{общее}) = 3,08 * 10^8 + 8,21 * 10^8 + 4,69 * 10^6 =$$
$$11,34 * 10^8 \text{ молей/сутки}$$

*Количество молей оксида азота в отходящих газах составит:*

$$N(NO) = C(NO) * N \text{ (общее)},$$

*где  $C(NO)$  - объемная доля оксида азота в отходящих газах, по*

*условию задачи равна  $150 * 10^{-6}$ .*

$$N(NO) = 150 * 10^{-6} * 11,34 * 10^8 = 1,70 * 10^5 \text{ молей/сутки}$$

Мольное отношение диоксида серы и оксида азота в отходящих газах составит:

$$n = N(\text{SO}_2) / N(\text{NO}) = 4,69 * 10^6 / 1,70 * 10^5 = 27,6 \sim 28$$

Массы диоксида серы и оксида азота, поступающего в атмосферу в процессе сжигания угля, можно определить по уравнению:

$$M = N * M.M.,$$

где:  $M$  - масса газа (г);  $N$  - содержание в отходящих газах

$$M(\text{SO}_2) = 4,69 * 10^6 * 64 = 300 * 10^6 \text{ г/сутки} = 300$$

$$M(\text{NO}) = 1,70 * 10^5 * 30 = 51 * 10^5 \text{ г/сутки} = 5,1 \text{ т/сутки}$$



## ***Ответ:***

***с отходящими газами тепловой станции  
в сутки в атмосферу поступает 300 т  
диоксида серы и 5,1 т оксида азота,  
мольное соотношение диоксида серы и  
оксида азота примерно равно 28***

# Концентрация диоксида серы в отходящих газах составит:

$$\alpha = v_{\text{SO}_2} / V_{\text{общ.}} = 4,69 \cdot 10^6 / 11,34 \cdot 10^8$$

$$\alpha = 4,13 \cdot 10^{-3}$$

Или

$$413 \text{ млн}^{-1}$$

Или

**1180 мг/куб. м.**

# Предельно допустимые концентрации загрязняющих веществ в РФ

№	Вещество	Класс опасности	ПДК <sub>МР</sub> , мг/м <sup>3</sup>	ПДК <sub>СС</sub> , мг/м <sup>3</sup>
1	<u>Оксид</u> <u>углерода</u> (CO)	4	5	3
2	<u>Диоксид</u> <u>азота</u> (NO <sub>2</sub> )	3	0,2	0,04
3	<u>Оксид</u> <u>азота</u> (NO)	3	0,4	0,06
5	<u>Метан</u> (CH <sub>4</sub> )	-	50 (ОБУВ)	-
6	<u>Диоксид</u> <u>серы</u> (SO <sub>2</sub> )	3	0,5	0,05
7	<u>Аммиак</u> (NH <sub>3</sub> )	4	0,2	0,04
8	<u>Сероводород</u> (H <sub>2</sub> S)	2	0,008	-
9	<u>Озон</u> (O <sub>3</sub> )	1	0,16	0,03
10	<u>Формальдегид</u>	2	0,05	0,01

Превышение ПДК <sub>а.в.</sub> составит

Для диоксида азота 750 раз.

Для диоксида серы 2360 раз.

# Очистка топочных газов от диоксида серы

## Известняковый (известковый) метод

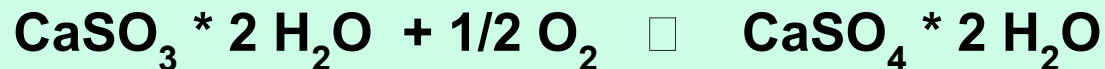
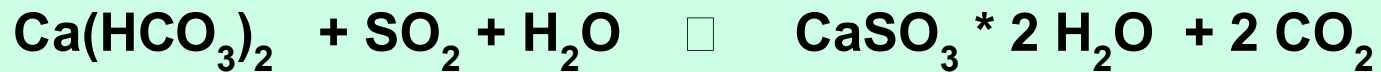
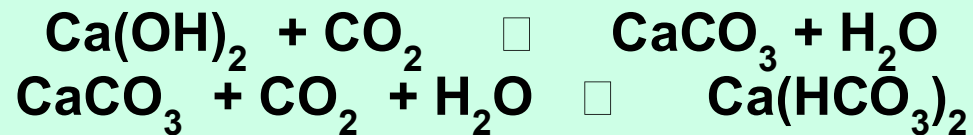
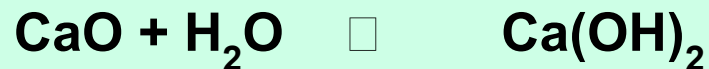
Основан на поглощении  $\text{SO}_2$  суспензией  $\text{CaCO}_3$  или  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  с образованием  $\text{CaSO}_3 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ,

В варианте с осуществлением процесса по типу распылит. сушки В варианте с осуществлением процесса по типу распылит. сушки при т-ре газа В варианте с осуществлением процесса по типу распылит. сушки при т-ре газа более  $150^\circ\text{C}$  влага суспензии В варианте с осуществлением

# Очистка топочных газов от диоксида серы

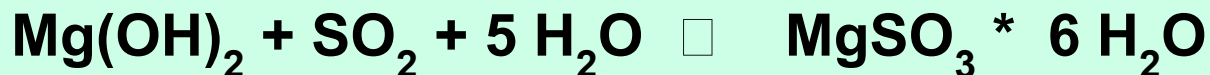
## Известковый и известняковый методы

Основные химические реакции, протекающие при взаимодействии  $\text{SO}_2$  с пульпой гидроксида кальция или известняка, описываются следующими уравнениями:

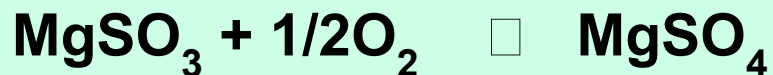


# Магнезитовый метод

Сущность метода состоит во взаимодействии  $\text{SO}_2$  с суспензией  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  по реакции:



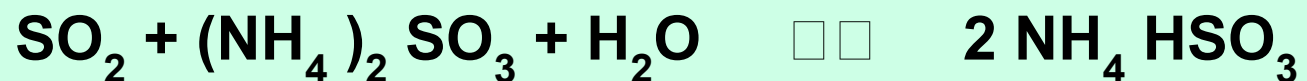
Кристаллический сульфит магния подвергают сушке и обжигу, получая при этом концентрированный поток  $\text{SO}_2$  и  $\text{MgO}$ . Оксид магния возвращается в цикл, а  $\text{SO}_2$  направляется на переработку (например, на получение серной кислоты по стандартной технологии). Часть сульфита магния под действием кислорода воздуха окисляется до сульфата:



Достоинствами магнезитового метода являются его цикличность, высокая эффективность (степень очистки 90-92%), возможность утилизации SO<sub>2</sub>. Основным недостатком процесса - большое количество твердофазных стадий, что приводит к сильному абразивному износу аппаратуры и загрязнению среды твердыми частицами. Весьма значительными являются и энергетические затраты на разложение сульфита и сульфата магния.

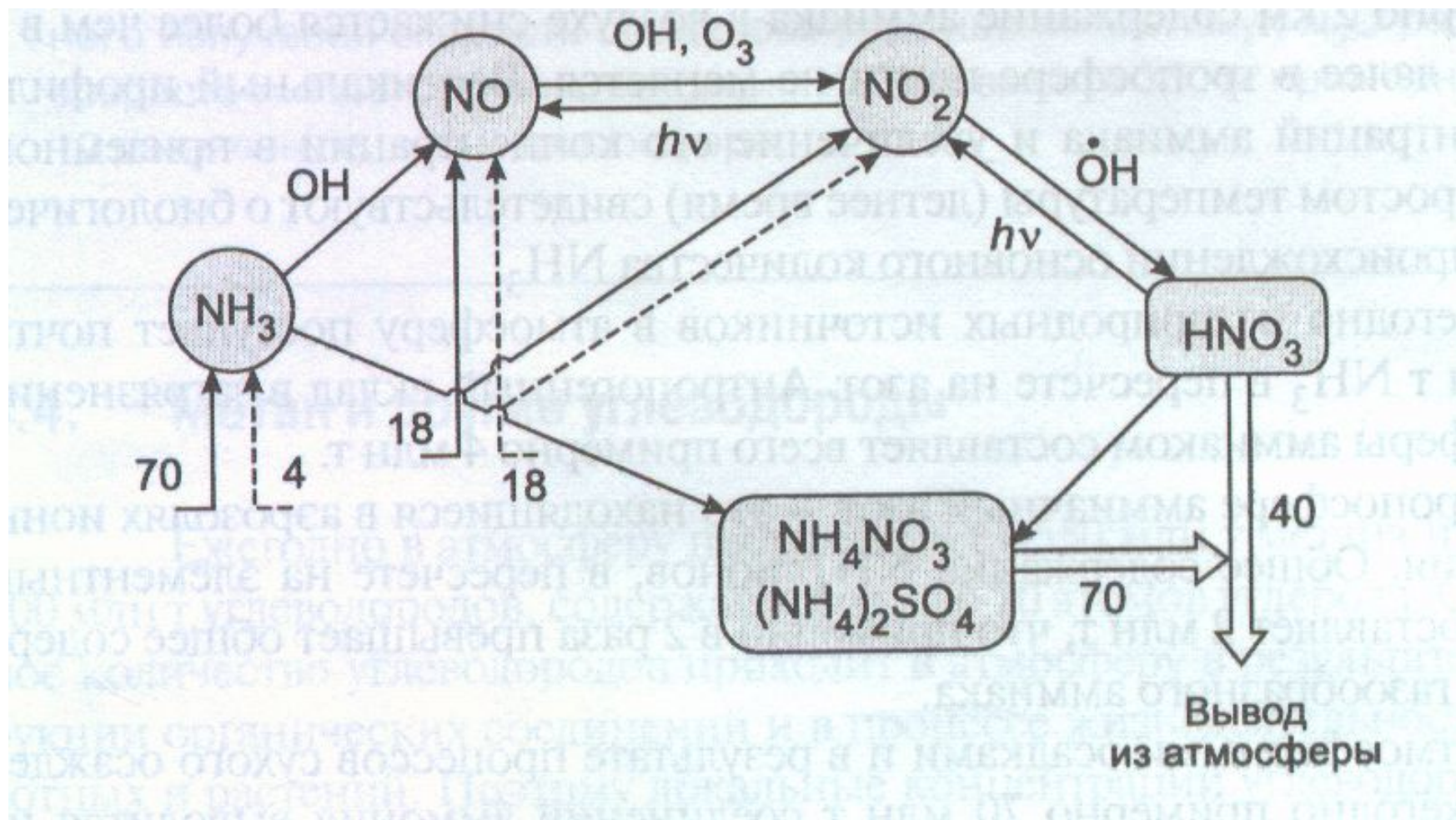
## Аммиачные методы

В основе этих методов лежит процесс абсорбции SO<sub>2</sub> раствором сульфита аммония:





# Схема трансформации соединений азота в тропосфере



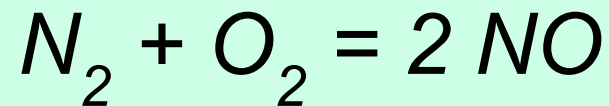
# **Процессы окисления азота воздуха**

**Константа равновесия реакции  
образования оксида азота из азота и  
кислорода при 800 К равна**

$$3 \cdot 10^{-11}.$$

**Какого равновесного значения может  
достигнуть концентрация оксида азота  
в смеси, если исходная смесь –воздух?**

*Процесс образования молекул оксида азота из азота и кислорода воздуха может быть представлен следующим уравнением:*



Константу равновесия можно представить уравнением:

$$K_p = P(NO)^2 / P(N_2) * P(O_2)$$

# Представим равновесные значения компонентов смеси в виде таблицы

Парциальное давление  $P$

компонентов, кПа

	$N_2$	$O_2$	$NO$
<i>В начале процесса</i>	79.12 *	22,23 *	0
<i>При равновесии</i>	79,12 - x	22,23 - x	2x
<i>Приближенное значение при равновесии</i>	79.12	22.23	2x

**При расчете можно воспользоваться приближенными равновесными значениями парциальных давлений компонентов смеси**

$$3 * 10^{-11} = 4x^2 / 79.12 * 22,23$$

$$x = P(NO) = 22,97 * 10^{-5} \text{ кПа} =$$

$$0,23 \text{ Па} = 0,023 \text{ млн}^{-1}$$

# Снижение выбросов оксидов азота в атмосферу путем регулирования процесса горения

Наряду с установкой газоочистного оборудования в конце технологического цикла сжигания топлива весьма эффективными являются ряд режимных и технологических мероприятий, позволяющих существенно снизить количество образующихся в процессе горения оксидов азота. К этим мероприятиям относятся:

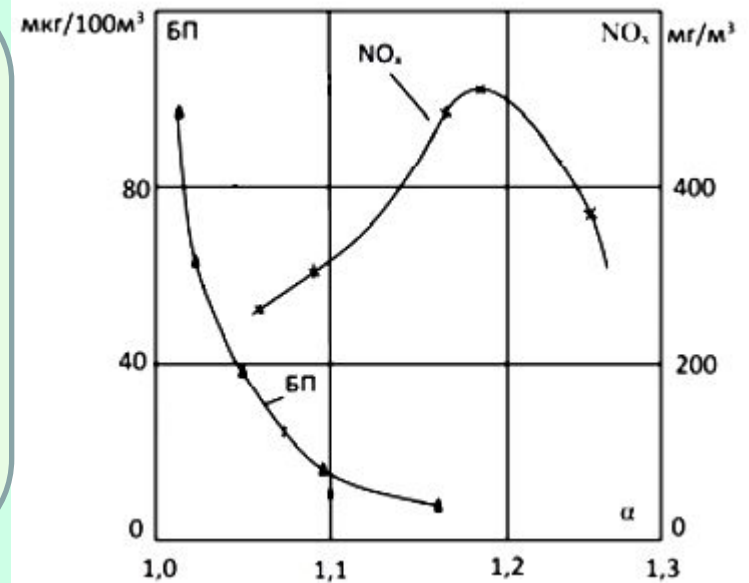
- сжигание с низким коэффициентом избытка воздуха ( $\alpha$  – альфа);
- рециркуляция части дымовых газов в зону горения;
- сжигание топлива в две и три ступени;
- применение горелок, позволяющих понизить выход  $\text{NO}_x$ ;
- подача влаги в зону горения;
- интенсификация излучения в топочной камере;
- выбор профиля топочной камеры, которому отвечает наименьший выход  $\text{NO}_x$ .

Следует отметить, что указанные мероприятия способны в той или иной мере подавить образование  $\text{NO}_x$  из азота воздуха, но не могут предотвратить их образования из азотосодержащих соединений, имеющих в составе топлива.

# Методы минимизации образования $\text{NO}_x$

## Изменение избытков воздуха

Позволяет снизить выбросы оксидов азота на **30%**. Снижение избытка воздуха возможно до момента, пока это не приводит к интенсивному росту продуктов неполного сгорания.



## Двухступенчатое сжигание

В топке организуются две зоны горения: первая – когда через горелки с топливом подается воздух в количестве, меньшем стехиометрического, во второй - вводится количество воздуха, необходимое для дожигания продуктов неполного сгорания из первой зоны. Опыт эксплуатации печных агрегатов показал возможности уменьшения почти **в 2 раза** выбросов  $\text{NO}_x$ .

# Методы минимизации образования $\text{NO}_x$

## Рециркуляция дымовых газов.

Этот метод заключается в отборе части дымовых газов из газоходов и подводе этих газов в зону горения (5-30%). Выход оксидов азота прямо пропорционален проценту рециркуляции, однако большое количество подаваемых газов может привести к уменьшению КПД котла. Наиболее оптимальная схема ввода дымовых газов рециркуляции позволяет снизить образование окислов азота **на 33%**.

## Впрыск влаги в зону горения

Снижается максимальная температура горения, тем самым препятствует образованию оксидов азота. Количество подаваемой в топочную камеру влаги должно составлять приблизительно 10% от массы топлива. Достигается снижение эмиссии оксидов азота **до 25%**.



# Методы очистки отходящих газов от $\text{NO}_x$

## Адсорбционные методы

Метод основан на способности некоторых твердых тел (адсорбентов) избирательно поглощать газообразные компоненты из газовых смесей. В виде адсорбента используется: ионообменная смола, силикагель, молекулярное сито, активный уголь.

## Каталитическое восстановление

Метод основан на восстановлении  $\text{NO}_x$  до нейтрального продукта с имеющимся катализатором либо без катализатора под действием высокой температуры в присутствии твердого, жидкого либо газообразного восстановителя.

## Карбамидный метод

Суть данного метода заключается в абсорбции  $\text{NO}_x$  водным раствором карбамида  $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ . В результате очистки образуется нетоксичный продукт -  $\text{N}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ .

# Очистка отходящих газов от оксидов азота

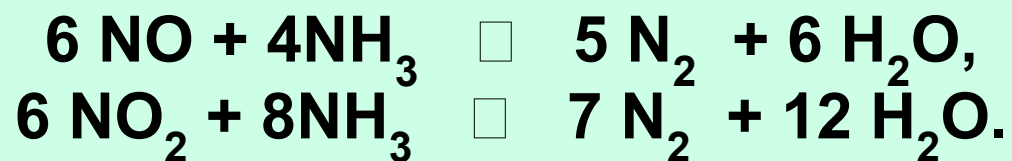
## Адсорбционные методы

В случае небольших объемов газов нашли применение адсорбционные методы. Хорошим сорбентом оксидов азота служит активированный уголь, но его применение затрудняется из-за легкой окисляемости, что может привести к сильному разогреву и даже к возгоранию угля (при значительных концентрациях оксидов азота). Силикагель по адсорбционным свойствам несколько уступает углю, но он более прочен и не окисляется кислородом, а окисление NO в NO<sub>2</sub> в его присутствии протекает даже быстрее. Однако широкому распространению этих методов препятствует то, что одновременно сорбируются и другие примеси, в результате снижается адсорбционная емкость сорбентов и осложняются процесс десорбции и использование ценных компонентов.

# Каталитическое восстановление

Одним из основных, хорошо освоенных промышленных методов очистки отходящих газов от оксидов азота является их восстановление на катализаторе до молекулярного азота. При использовании неселективного катализатора восстановитель расходуется не только на восстановление азота, но и вступает во взаимодействие с кислородом, обычно содержащимся в газовом потоке. В качестве восстановителя применяются водород, природный газ, оксид углерода и др. Катализаторами обычно служат элементы платиновой группы. Температура процесса колеблется от 400 до 800°C.

Наиболее широкое распространение получило селективное каталитическое восстановление оксидов азота аммиаком:



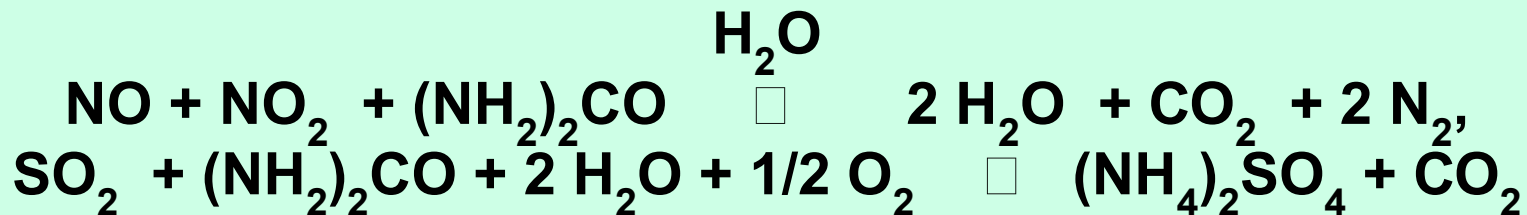
В нашей стране для этих целей разработан специальный алюмо-ванадиевый катализатор (АВК-10). Процесс восстановления протекает при 200-360<sup>0</sup>С, степень очистки составляет 96-98,5%. Основным недостатком метода является необходимость точного дозирования аммиака, что при переменном составе отходящих газов (меняется концентрация оксидов азота) практически невозможно. При недостатке аммиака происходит проскок оксидов азота, а при избытке – проскок аммиака, и отходящие газы загрязняются токсичными соединениями.

# Карбамидный метод

В РХТУ им. Д.И. Менделеева разработан Карбамидный метод, позволяющий очищать дымовые газы от оксидов азота на 95% и практически полностью удалять оксиды серы из них.

Процесс не требует предварительной подготовки газов, в результате очистки образуются нетоксичные продукты -  $N_2$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$  и  $(NH_4)_2SO_4$ . Величина pH абсорбционного раствора колеблется в пределах 5-9, поэтому коррозии аппаратуры не наблюдается. Эффективность метода практически не зависит от колебаний входных концентраций оксидов азота и серы.

В общем виде процесс описывается приведенными ниже уравнениями реакций:



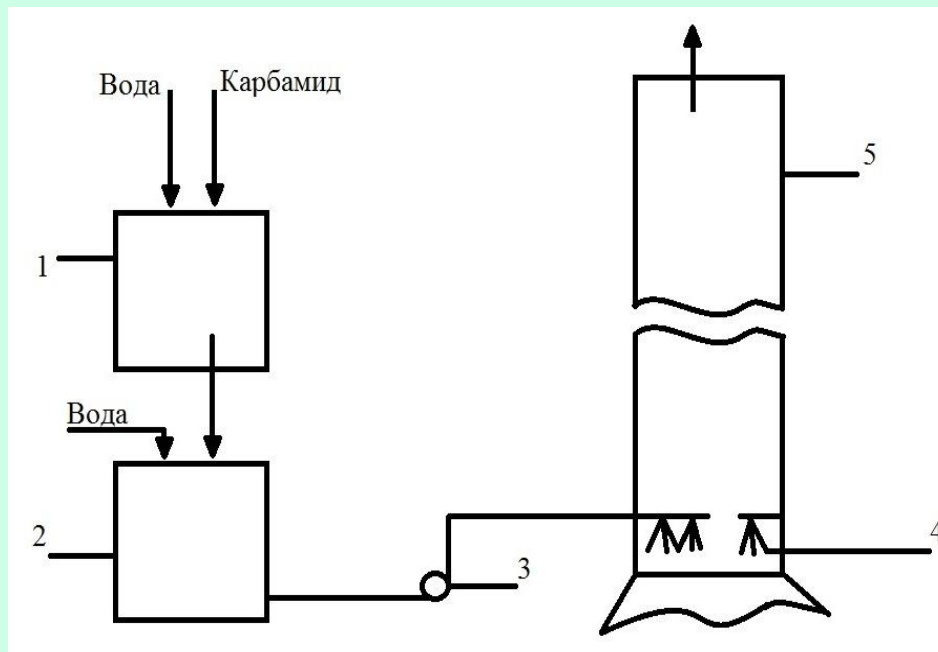
1- емкость для смешивания карбамида с  
водой

2- рабочий раствор карбамида,

3- насос,

4- форсунки,

5- дымовая труба.



$H_2O$

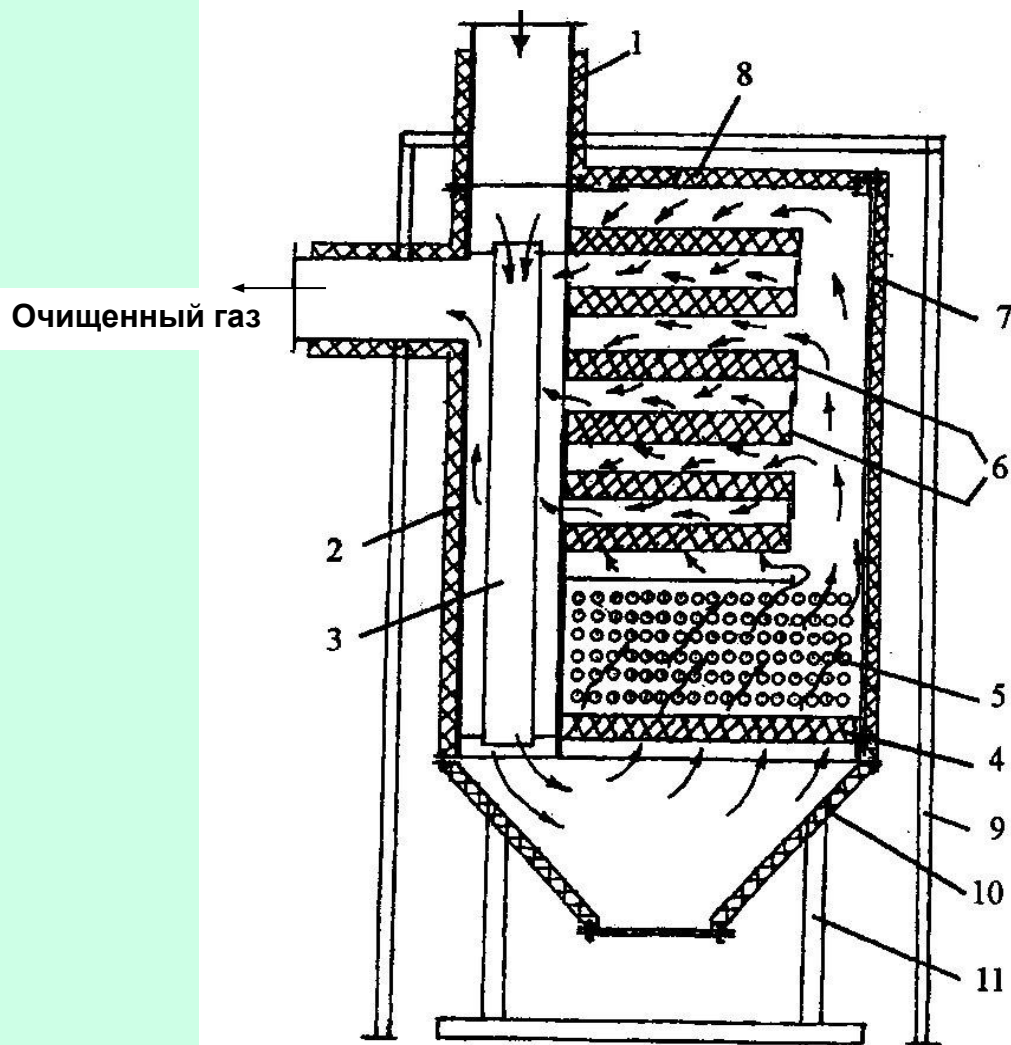


## **Очистка отходящих газов от оксида углерода и углеводородов**

**Основным методом очистки от углеводородов и оксида углерода в промышленности являются сжигание в пламени, а также термическое и каталитическое окисление. Наиболее известным примером сжигания является широко применяемое в нефтедобывающей и нефтеперерабатывающей промышленности сжигание в факеле, т.е. в открытой горелке, направленной вверх. К недостаткам процесса, помимо потерь углеводородов при горении следует отнести образование оксидов азота, а следовательно, вторичное загрязнение атмосферы.**

В условиях термического и каталитического окисления обезвреживание углеводородов и оксида углерода протекает при более низких температурах и образования значительных количеств оксидов азота не происходит.

Отходящие газы на очистку



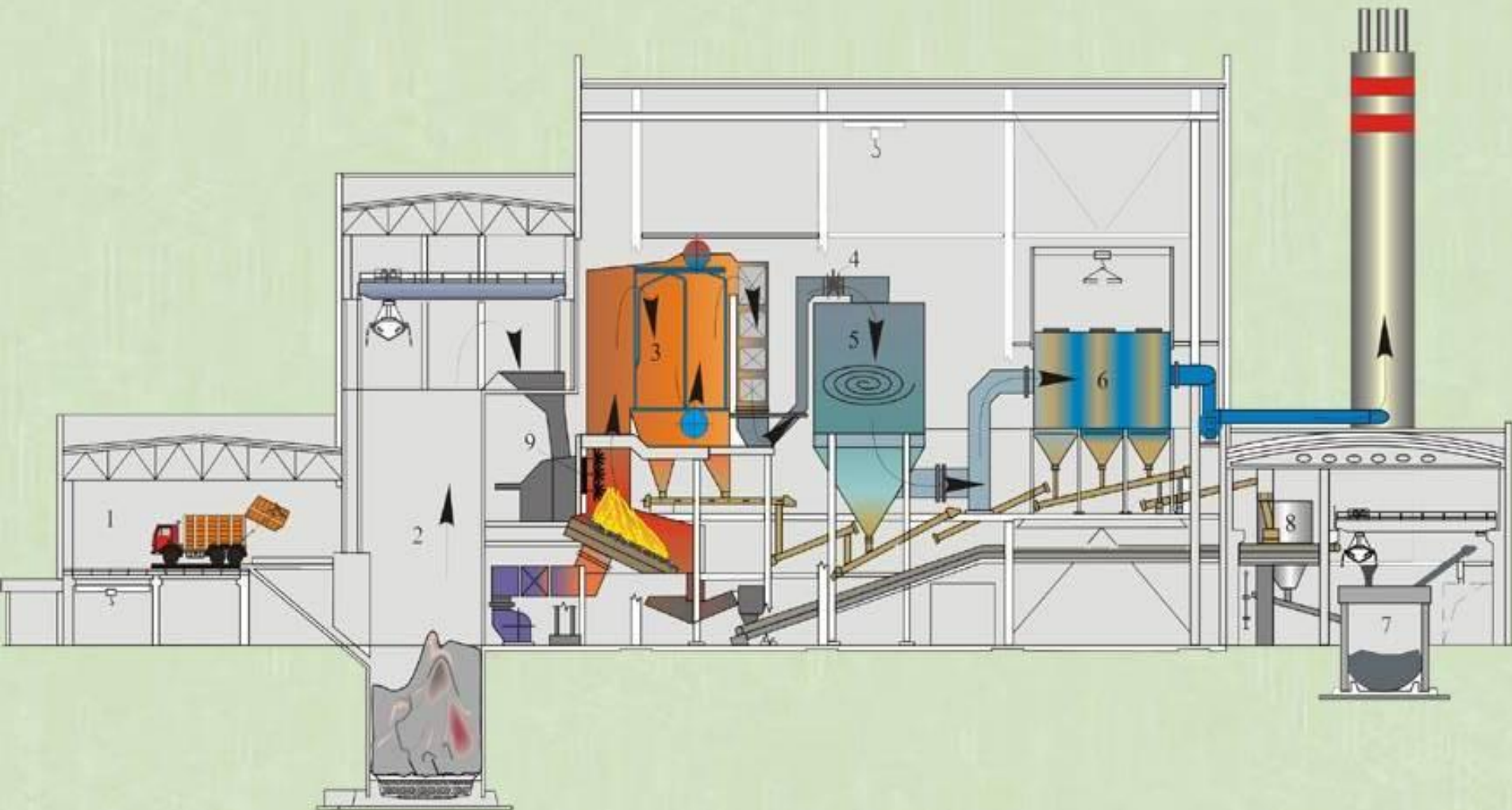
**Термокаталитический реактор (ТКР-КС-1):**

- 1 – входной патрубок,
- 2 – корпус,
- 3 – рекуператор тепла,
- 4 – кассета фильтра,
- 5 – теплоэлектро-нагреватели,
- 6 – съемные кассеты,
- 7,8 – боковая и верхняя крышки,
- 9 – защитный кожух,
- 10 – бункер,
- 11 – опора.



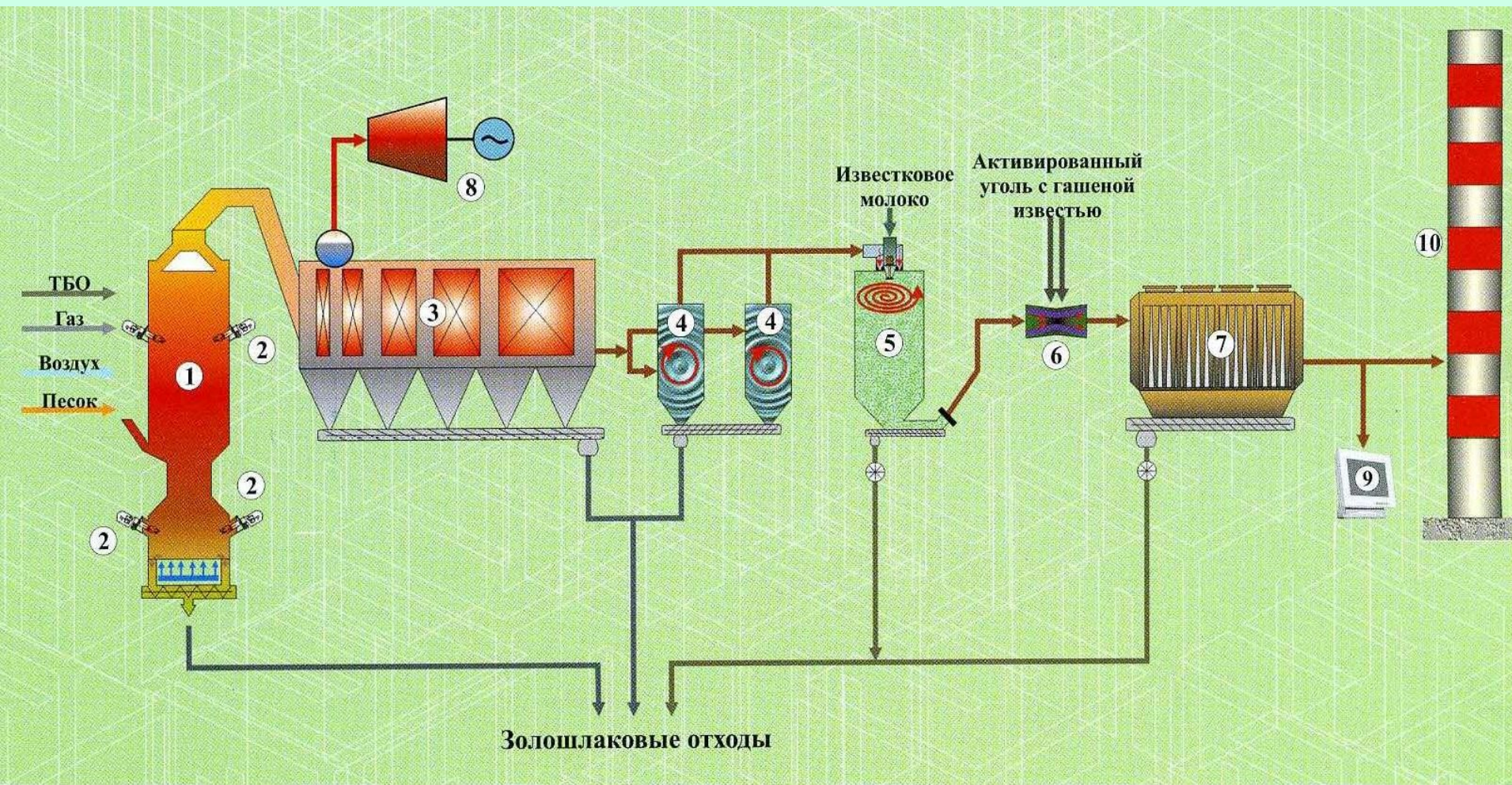
# Содержание загрязняющих веществ в дымовых газах при мусоросжигании

Компонент	Типичная концентрация в дымовых газах до очистки, мг/нм <sup>3</sup>	Состав дымовых газов МСЗ № 2, мг/нм <sup>3</sup>		ПДКс.с., мг/нм <sup>3</sup>
		До очистки	После очистки	
<b>Летучая зола (пыль)</b>	6980	2740	8	0,1
<b>НСI</b>	750	1220	9	0,2
<b>HF</b>	10	40	0,7	0,005
<b>SO<sub>2</sub></b>	250	300	39	0,05
<b>NOx</b>	260	420	98	0,04
<b>Hg</b>	0,2	-	-	0,0003
<b>Cd</b> <b>Pb</b>	2 (общая)	-	0,06	0,0003 (у каждого)
<b>Др. тяжелые металлы</b>	50 (общая)	-	0,06	0,001 (в среднем у каждого)
<b>CO</b>	250	40	40	3,0
<b>Органические вещества</b>	100 (общая)	4,3	4,2	1 · 10 <sup>-7</sup> (бенз(а)-пирен)
<b>Диоксины и фураны</b>	2 · 10 <sup>-6</sup> (общая)	4,1·10 <sup>-6</sup>	9,0 · 10 <sup>-8</sup>	0,5 · 10 <sup>-9</sup> (общая)



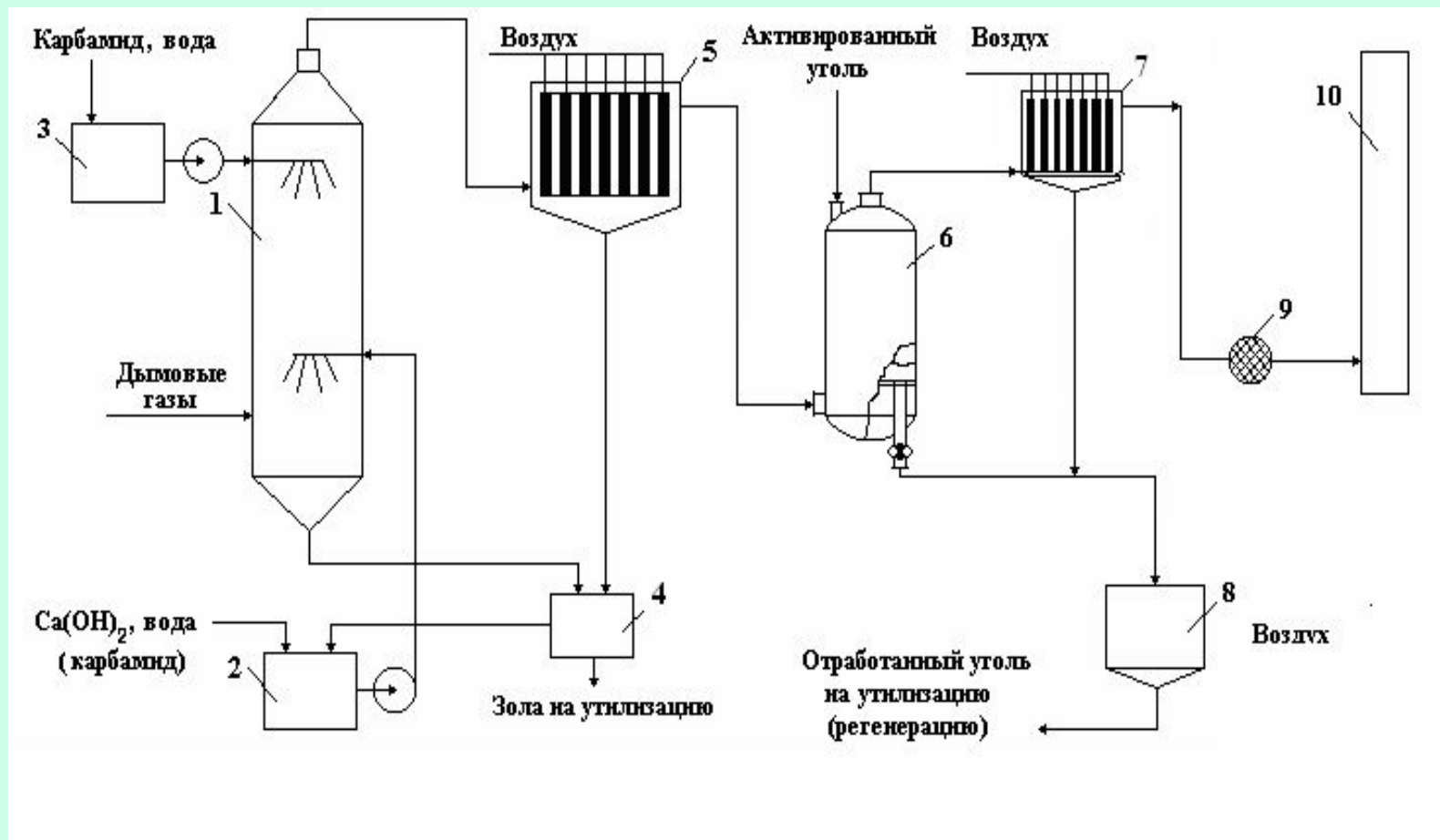
**Рис.6.7. Мусоросжигательный завод № 2:**

**1 – приемное отделение; 2 – приемный бункер ТБО;  
3 – котлоагрегат; 4, 5, 6 – отделение газоочистки; 7, 8 – шлаковое отделение; 9 – загрузка ТБО в печь.**



**Рис.6.9. Мусоросжигательный завод № 4:**

**1 – печь для сжигания отходов; 2 – газовые горелки; 3 – котел-утилизатор; 4 – циклон; 5 – распылительный абсорбер; 6 – реактор с активированным углем; 7 – рукавный фильтр; 8 – турбогенератор; 9 – контроль дымовых газов; 10 – дымовая труба.**



**Рис. 1. Модифицированный вариант системы газоочистки:**

- 1 – абсорбер; 2 – емкость для приготовления рабочей суспензии известкового молока; 3 – емкость для приготовления рабочего раствора карбамида;**
- 4 – емкость для сбора летучей золы; 5 – рукавный фильтр; 6 – адсорбер;**
- 7 – контрольный рукавный фильтр; 8 – емкость для сбора отработанного активированного угля; 9 – дымосос;**
- 10 – дымовая труба.**