

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**  
**БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**  
**ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ**

**Кафедра «Промышленная теплоэнергетика и теплотехника»**

**Электронный учебно-методический комплекс**

**ЭКОЛОГИЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

для специальности 1-43 01 05 «Промышленная теплоэнергетика»

**Составители: Прокопеня И.Н.**

**МИНСК 2020 г**

## Пояснительная записка

Целью изучения дисциплины, на базе разработанного электронного учебно-методического комплекса является формирование научного мировоззрения и системы знаний в области инженерной экологии, энергетических проблем охраны окружающей среды и рационального использования энергетических ресурсов. Дисциплина является основной в комплексной программе непрерывной экологической подготовки инженеров.

Задачей изучения дисциплины является приобретение системных знаний, включающих:

- сущность и задачи экологических мероприятий в теплоэнергетике, основные аспекты экологии теплоэнергетических систем;
- анализ характеристик выбросов теплоэнергетических систем и установок и их влияния на окружающую среду;
- методы и средства снижения вредного влияния энергетических процессов на окружающую среду;
- методы и средства очистки сточных вод и газообразных выбросов вредных веществ энергоустановок;
- выбор, расчет и эксплуатация очистной аппаратуры и оборудования для улавливания вредных веществ технологических и тепловых выбросов и обеспечения нормативного состояния окружающей среды;
- выбор и расчет оптимальных схем энергоснабжения, обеспечивающих рациональное использование природной воды и атмосферного воздуха.

Материалы данного электронного учебно-методического комплекса можно использовать при выполнении курсовых и дипломных проектов (работ), посвященных оценке разрабатываемой темы с точки зрения экологии и охраны окружающей среды.

Полученные знания при изучении данного электронного учебно-методического комплекса предназначены для формирования научного мышления и профессиональной ответственности инженеров энергетического профиля в области экологии и охраны окружающей среды.

Учебно-методический комплекс включает в себя:

### **Теоретический раздел:**

- «Экология теплоэнергетических систем» - конспект лекций;

### **Практический раздел:**

- «Экология теплоэнергетических систем» - практические задания;

**Контроль знаний:**

- «Экология теплоэнергетических систем» - перечень вопросов, выносимых на зачет;

**Вспомогательный раздел:**

- «Экология теплоэнергетических систем» - учебная программа для учреждения высшего образования.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ .....	7
1.1 ВВЕДЕНИЕ .....	7
1.2 КЛАССИФИКАЦИЯ ОТРАСЛЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ ПО СТЕПЕНИ ОПАСНОСТИ ДЛЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ .....	7
1.3 ВОЗДЕЙСТВИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ .....	9
1.4 ВОЗДЕЙСТВИЕ НЕФТЕДОБЫВАЮЩЕЙ, НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕЙ И НЕФТЕХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ .....	11
1.5 ВОЗДЕЙСТВИЕ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ (ТЭС) НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ .....	13
1.6 ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ОГРАНИЧЕНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ .	16
1.7 ВОЗДЕЙСТВИЕ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ (ГЭС) НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ .....	19
1.8 ДИОКСИД СЕРЫ (SO <sub>2</sub> ) И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА ЖИВЫЕ ОРГАНИЗМЫ И ЗАГРЯЗНЕНИЕ ОС .....	20
1.9 ОКСИДЫ АЗОТА (NO <sub>x</sub> ) И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ЖИВЫЕ ОРГАНИЗМЫ И ЗАГРЯЗНЕНИЕ ОС .....	22
1.10 ОКСИДЫ УГЛЕРОДА И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ЖИВЫЕ ОРГАНИЗМЫ И ЗАГРЯЗНЕНИЕ ОС .....	25
1.11 ТВЕРДЫЕ ВЫБРОСЫ И БЕНЗАПИРЕН И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ЖИВЫЕ ОРГАНИЗМЫ И ЗАГРЯЗНЕНИЕ ОС .....	26
1.12 МЕРОПРИЯТИЯ ПО ОГРАНИЧЕНИЮ ВЫБРОСОВ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ В АТМОСФЕРУ .....	27
1.13 ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЫЛЕЙ .....	27
1.14 ФИЗИОЛОГИЧЕСКОЕ ВЛИЯНИЕ ПЫЛИ НА ЧЕЛОВЕЧЕСКИЙ ОРГАНИЗМ .....	32
1.15 ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ПЫЛЕУЛОВИТЕЛЕЙ .....	32
1.16 ГАЗООЧИСТКА НА АЭС .....	34
1.17 СНИЖЕНИЕ ВЫБРОСОВ ДИОКСИДА СЕРЫ SO <sub>2</sub> . УДАЛЕНИЕ СЕРЫ ИЗ ТОПЛИВА ДО ЕГО СЖИГАНИЯ .....	35
1.18 ОЧИСТКА ОТ СОЕДИНЕНИЙ СЕРЫ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ ТОПЛИВ (СЕРООЧИСТКА ДЫМОВЫХ ГАЗОВ) .....	37
1.19 МОКРАЯ ИЗВЕСТНЯКОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ СЕРООЧИСТКИ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ ....	38
1.20 МОКРАЯ ИЗВЕСТКОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ СЕРООЧИСТКИ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ .....	39
1.21 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СКРУББЕРОВ ВЕНТУРИ В СЕРООЧИСТКЕ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ.	40
1.22 СНИЖЕНИЕ ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ СОЕДИНЕНИЙ СЕРЫ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ СЖИГАНИЯ .....	41
1.23 ОБРАЗОВАНИЕ ОКСИДОВ АЗОТА ПРИ ГОРЕНИИ ОРГАНИЧЕСКИХ ТОПЛИВ .....	41
1.24 ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ПОДАВЛЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ NO <sub>x</sub> . РЕЦИРКУЛЯЦИЯ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ .....	43
1.25 ОЧИСТКА ДЫМОВЫХ ГАЗОВ ОТ ОКСИДОВ АЗОТА .....	44
1.26 ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМЫЕ КОНЦЕНТРАЦИИ (ПДК) .....	45
1.27 ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМЫЕ ВЫБРОСЫ (ПДВ) .....	47
1.28 РАССЕЙВАНИЕ ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ В АТМОСФЕРЕ .....	47
1.29 ВОЗДЕЙСТВИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ГИДРОСФЕРУ .....	49

1.30	ВЛИЯНИЕ СТОЧНЫХ ВОД ТЭС НА ПРИРОДНЫЕ ВОДОЕМЫ.....	51
1.31	ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД....	52
1.32	БИОЛОГИЧЕСКАЯ ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД.....	54
1.33	РОЛЬ АВТОТРАНСПОРТА В ЗАГРЯЗНЕНИИ ГОРОДОВ .....	57
1.34	ПРОМЫШЛЕННЫЕ ОТХОДЫ.....	59
1.35	СПОСОБЫ УТИЛИЗАЦИИ ОТХОДОВ:.....	60
	ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАДАНИЯ.....	64
1.36	РАСЧЕТ ЦИКЛОНА .....	64
1.37	РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОФИЛЬТРА .....	67
1.38	РАСЧЕТ СКРУББЕРА ВЕНТУРИ.....	70
1.39	РАСЧЕТ ТКАНЕВОГО РУКАВНОГО ФИЛЬТРА С РЕГЕНЕРАЦИЕЙ (ОБРАТНОЙ ПРОДУВКОЙ).....	75
1.40	РАСЧЕТ ПЕСКОЛОВКИ-ЖИРОЛОВКИ.....	79
1.41	РАСЧЕТ ВЫБРОСА ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ ПРИ СЖИГАНИИ ТОПЛИВА В КОТЛОАГРЕГАТАХ КОТЕЛЬНОЙ.....	81
1.42	ПРИМЕР РАСЧЕТА ВЫБРОСОВ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ В АТМОСФЕРЕ ПРИ СЖИГАНИИ ТОПЛИВА В КОТЕЛЬНЫХ .....	87
1.43	РАСЧЕТ РАССЕЙВАНИЯ И НОРМАТИВОВ ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМЫХ ВЫБРОСОВ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ В АТМОСФЕРЕ.....	89
1.44	РАСЧЕТ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ ВЫБРОСАМИ ОДИНОЧНОГО ИСТОЧНИКА 90	
1.45	ПРИМЕР РАСЧЕТА РАССЕЙВАНИЯ И НОРМАТИВОВ ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМЫХ ВЫБРОСОВ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ В АТМОСФЕРЕ.....	94
	ПЕРЕЧЕНЬ ВОПРОСОВ, ВЫНОСИМЫХ НА ЗАЧЕТ.....	98
	УЧЕБНАЯ ПРОГРАММА .....	101

**Электронный учебно-методический комплекс**

**Теоретический раздел**

**ЭКОЛОГИЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

**Конспект лекций**

**Минск 2020**

# КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ

## 1.1 ВВЕДЕНИЕ

Изучение дисциплины «Экология теплоэнергетических систем» способствует усвоению теоретических знаний и приобретение практических навыков, необходимых для проведения прикладных исследований по предотвращению загрязнения окружающей среды на промышленных предприятиях в области получаемой в вузе специальности.

Основные задачи дисциплины при ее ориентации на специальность 1-43 01 05 «Промышленная теплоэнергетика» могут быть сформулированы как ознакомление будущих инженеров-энергетиков с экологическим состоянием основных объектов электроэнергетики, с мероприятиями по охране атмосферного воздуха, водных объектов, земельных ресурсов; с существующими методами определения выбросов вредных веществ в атмосферу; получение навыков расчета ущерба от загрязнения окружающей среды.

В данном курсе лекций рассмотрены методы оценки масштабов воздействия на окружающую среду действующих и перспективных источников электроэнергии и электрических сетей, приведены характеристики основных природоохранных мероприятий, применяемых на различных объектах электроэнергетики; представлены стоимостные показатели и показатели ущерба, необходимые для эколого-экономического сопоставления вариантов развития и размещения объектов электроэнергетики.

Курс лекций составлен в соответствии с рабочей программой дисциплины «Экология теплоэнергетических систем» путем подбора и систематизации материала ряда литературных источников и предназначен для студентов специальности 1-43 01 05 «Промышленная теплоэнергетика» дневной и заочной форм обучения.

Для успешного усвоения материала кратко излагаются основные теоретические положения и приводятся конкретные примеры.

## 1.2 КЛАССИФИКАЦИЯ ОТРАСЛЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ ПО СТЕПЕНИ ОПАСНОСТИ ДЛЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

При создании данной классификации учитываются следующие характеристики:

- разнообразие выбросов (сбросов) предприятий отрасли;
- объемы выбросов (сбросов);
- класс токсичности выбросов (сбросов).

Исходя из перечисленных характеристик, рассчитывается коэффициент токсичности выбросов (сбросов).

Для его расчета предлагается следующая формула:

$$K_T = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i} \cdot M_i}{\sum_{i=1}^n M_i}$$

где:  $C_i$  – ПДК выбрасываемого  $i$ -го вещества отраслью промышленности;  
 $M_i$  – объем выбросов (сбросов) того или иного вещества;  
 $n$  – число выбрасываемых веществ.

Анализ этих показателей позволяет подразделить отрасли промышленности по степени токсичности выбросов (таблица 1) и сбросов (таблица 2) на четыре группы.

Таблица 1. Группировка отраслей промышленности по коэффициенту токсичности выбросов в атмосферу

Отрасли промышленности	Коэффициент токсичности выбросов в атмосферу	Оценка токсичности выбросов
Цветная металлургия, нефтехимическая, химическая промышленность	$K_T = 10,1-15$	Особенно токсичные выбросы
Нефтехимическая промышленность, микробиологическая промышленность	$K_T = 5,1-10$	Очень токсичные выбросы
Черная металлургия, лесная, деревообрабатывающая, целлюлозно-бумажная промышленность	$K_T = 1,6-5$	Токсичные выбросы
Энергетическая промышленность Машиностроение, Металлообработка, легкая промышленность, пищевая промышленность	$K_T = 1,0-1,5$	Менее токсичные выбросы



Таблица 2. Группировка отраслей промышленности по коэффициенту токсичности сбросов в воду

Отрасли промышленности	Коэффициент токсичности сбросов в водоемы	Оценка токсичности сбросов
Микробиологическая, химическая нефтехимическая целлюлозно-бумажная	$K_T > 5,1$	Особенно токсичные сбросы
Цветная металлургия, черная металлургия	$K_T = 2,1-5,0$	Очень токсичные сбросы
Пищевая, энергетическая промышленность	$K_T = 1,1-2,0$	Токсичные сбросы
Машиностроение, металлообработка, легкая промышленность	$K_T = 0,5-1,0$	Менее токсичные сбросы

Высокая степень экологической опасности присуща цветной металлургии, микробиологической, нефтехимической и химической промышленности. Особенно опасно сочетание цветной металлургии с нефтехимией и химией, т.к. происходит эффект «суммации».

### 1.3 ВОЗДЕЙСТВИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

Металлургическая промышленность (металлургия) охватывает:

1. подготовку и обогащение добытых руд;
2. процесс получения металлов из подготовленного сырья;
3. либо очистку (рафинирование металлов);
4. либо производство металлических сплавов и прокатку.

Различают:

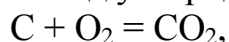
**Металлургию черных металлов**, основу которой составляет получение железа и его сплавов – чугуна, стали (сплавы железа с углеродом), ферросплавы (сплавы железа с другими металлами);

**Металлургию цветных металлов**, основу которой составляет получение всех остальных металлов и их сплавов.

#### Черная металлургия

В основе производства *железа и его сплавов* лежат реакции восстановления природных оксидов железа (магнитного железняка  $Fe_3O_4$ , красного железняка  $Fe_2O_3$ , бурого железняка  $Fe_2O_3 \cdot nH_2O$ ) монооксидом углерода (CO) и коксом.

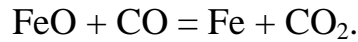
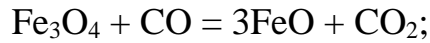
При сгорании кокса образуется диоксид углерода (углекислый газ):



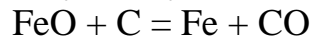
Который проходя через раскаленный кокс, превращается в монооксид углерода:



Монооксид углерода восстанавливает руду. Реакция идет в несколько стадий при разной температуре:



В восстановлении оксидов железа участвует также и углерод кокса:



Черная металлургия является источником загрязнения воздуха из-за содержания токсичного *монооксида углерода в отходящем газе* (дело в том, что отходящие газы представляют собой ценное топливо, которое очищают и используют на металлургических предприятиях, но из-за большого объема устаревших основных фондов металлургия продолжает загрязнять окружающую среду).

Кроме того, железные руды содержат соединения серы, поэтому в *отходящих газах* предприятий черной металлургии содержится и *сернистый газ SO<sub>2</sub>*.

При загрузке металлургических печей (доменных, конверторных мартеновских) рудой и коксом также возможно загрязнение воздуха *пылью*. Кроме того, при работе металлургических печей в воздух выделяются *сульфиды, меркаптаны (R-S-H)* и другие химические вещества с неприятным запахом.

Любое металлургическое производство, как правило, является тем промышленным центром, вокруг которого вырастают крупные населенные пункты с высокой плотностью населения. Проблема атмосферного загрязнения в таких местностях всегда неизбежна, экологическая вредность предприятий металлургии, как правило усугубляется большим объемом производства. Так, например:

Металлургический завод полного цикла мощностью 1 млн т стали/год (рис. 1), включающий основные производства – доменное, конвертерное, мартеновское, прокатное и ТЭЦ, ежедневно поставляет в природную среду: 200–350 т золы в золоотвал и 1100 т шлаков в шлакоотвал; сбрасывает в водоемы в среднем 18000 м<sup>3</sup> теплых сточных вод; выбрасывает в атмосферу до 100 т пыли, 200 т CO, 10 т оксидов азота и от 10 до 100 т SO<sub>2</sub>.

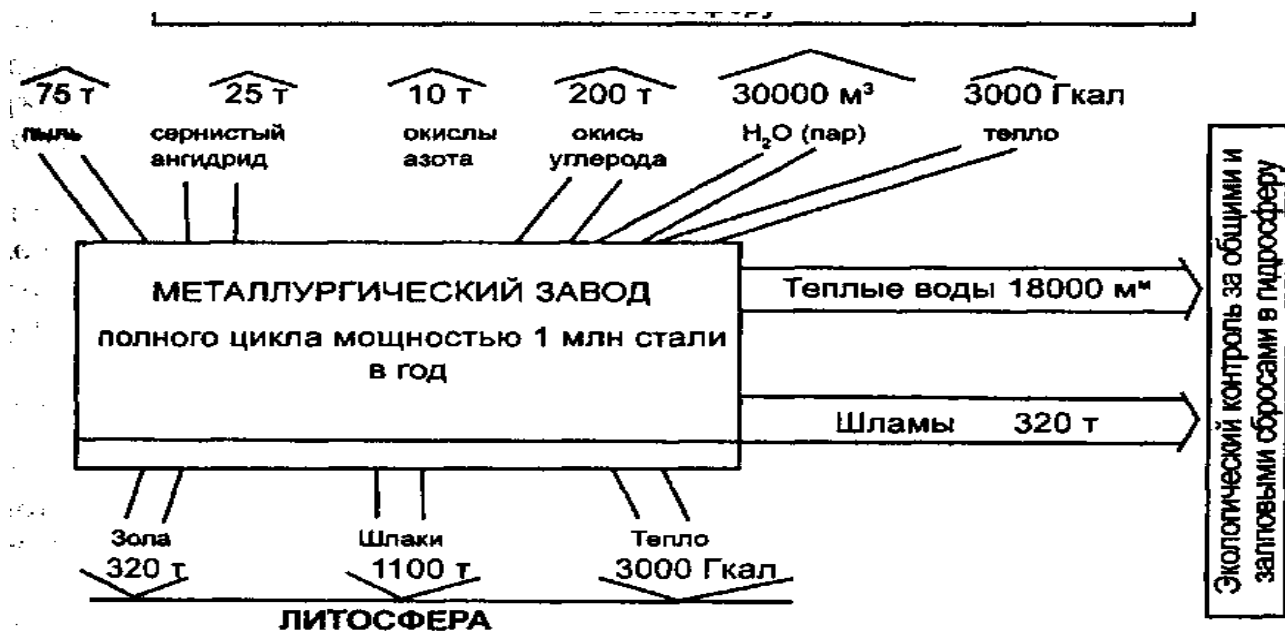


Рисунок 1 – Выбросы и сбросы от металлургический завода полного цикла мощностью 1 млн т стали/год.

Пыль на 50–70% состоит из железа и его соединений. Выбросы марганца, меди, никеля, цинка, хрома, свинца, т.е. цветных металлов сравнительно невелики.

Загрязнение воздуха от предприятий черной металлургии в зависимости от силы ветра может распространяться на расстояние 15–25 км. (Радиус воздействия завода мощностью 1 млн. т чугуна/год составляет 10 км, при мощности 3 млн.т/год – 20–25 км<sup>2</sup>).

### Цветная металлургия

Радиус воздействия на природную среду крупных центров цветной металлургии достигают сотен и тыс. км<sup>2</sup>.

В цветной металлургии главную опасность представляют выбросы соединений высокотоксичных металлов, таких как *медь, свинец, ртуть, кадмий, цинк*, а также большое количество обжиговых газов, содержащих *соединения серы* (преимущественно *SO<sub>2</sub>*), *фтор* и его производные.

В таблице 3 представлены данные о выбросе некоторых элементов в цветной металлургии.

Таблица 3. Выброс химических элементов в атмосферу при производстве цветных металлов, кг/т металла

Элемент	Производство		
	Медно-никелевое	Цинко-кадмиевое	Свинцовое
Мышьяк	3,0	0,6	0,363
Кадмий	0,2	0,5	0,005
Медь	2,5	0,14	0,072
Ртуть	–	0,042	0,002
Никель	9,0	–	0,085
Свинец	3,1	2,5	6,36
Цинк	0,845	15,7	0,11

Наиболее опасны из этих элементов мышьяк и ртуть, мышьяка содержится больше в выбросах медно-никелевого производства, а ртути – в выбросах цинко-кадмиевого производства.

Твердыми отходами черной и цветной металлургии являются шлаки (в числе которых *SiO<sub>2</sub>, CaO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, FeO, MnO*, тяжелые металлы, мышьяк, сурьма и другие примеси), которые в виде пыли из отвалов попадают в атмосферу, особенно в ветреную погоду.

Выплавка цветных металлов в мире значительно меньше, чем черных, однако выход шлаков на 1 т цветного металла больше, чем на 1 т черного металла.

## 1.4 ВОЗДЕЙСТВИЕ НЕФТЕДОБЫВАЮЩЕЙ, НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕЙ И НЕФТЕХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

Основными сооружениями **нефтедобычи** являются:

1. Скважины – основные источники загрязнения;
2. Компрессорно-насосные станции;

3. Сборные пункты, нефтехранилища;
4. Пункты первичной подготовки нефти, трубопроводы.

Характерные загрязняющие вещества, образующиеся в процессе добычи нефти это:

- А) углеводороды – 50%;
- Б) СО – 30%;
- В) твердые вещества – 20%

Основными источниками газовых выбросов, являются *скважины*. Газовые техногенные потоки формируются из природного газа (попутный газ), ушедшего в воздух в результате утечек, а также продуктов его сгорания, образующихся при сжигании неутрализованного газа<sup>1</sup>.

При отделении газового компонента от нефти, в состав газа попадает конденсат углеводородов, при неполном сжигании которого образуется бензапирен.

Кроме того в состав газовых потоков входят H<sub>2</sub>S (в составе природного газа содержится до 2% H<sub>2</sub>S), SO<sub>2</sub> и меркаптаны. Кстати, сера может входить в состав нефти и в твердом виде как простое вещество. Содержание сернистых соединений в сырой нефти составляет от 0,1 до 4,5%. В странах СНГ примерно 65–69% добываемой нефти относится к сернистым (содержание общей серы до 1,9%) и высокосернистым (свыше 2%).

Зольность нефти невелика – 0,1%. Для сравнения зольность угля составляет 1% и более.

Добываемая нефть содержит также железо, ванадий и соли щелочных и щелочноземельных металлов, образующие шлаки.

Водные потоки формируются в результате сбрасывания или утечек так называемых нефтяных вод – вод отделенных от нефти в результате обезвоживания. Сточные воды обычно сбрасываются в специальные бассейны, природные или искусственные резервуары, их стараются утилизировать. В любых случаях возможны утечки этих вод (аварии).

Еще более значительным источником загрязнения атмосферного воздуха являются **нефтеперерабатывающие заводы**.

Таблица 4. Выброс в атмосферу газов нефтеперерабатывающим заводом (мощностью 12 млн.т. в год, по А.С. Бобкову, 1997)

Загрязняющее вещество	Выброс в атмосферу, тыс. т/год	
	минуя очистные сооружения	после очистки
C <sub>x</sub> H <sub>y</sub>	190	0,520
H <sub>2</sub> S	0,64	0,002
СО	219	0,600
SO <sub>2</sub>	115	0.310

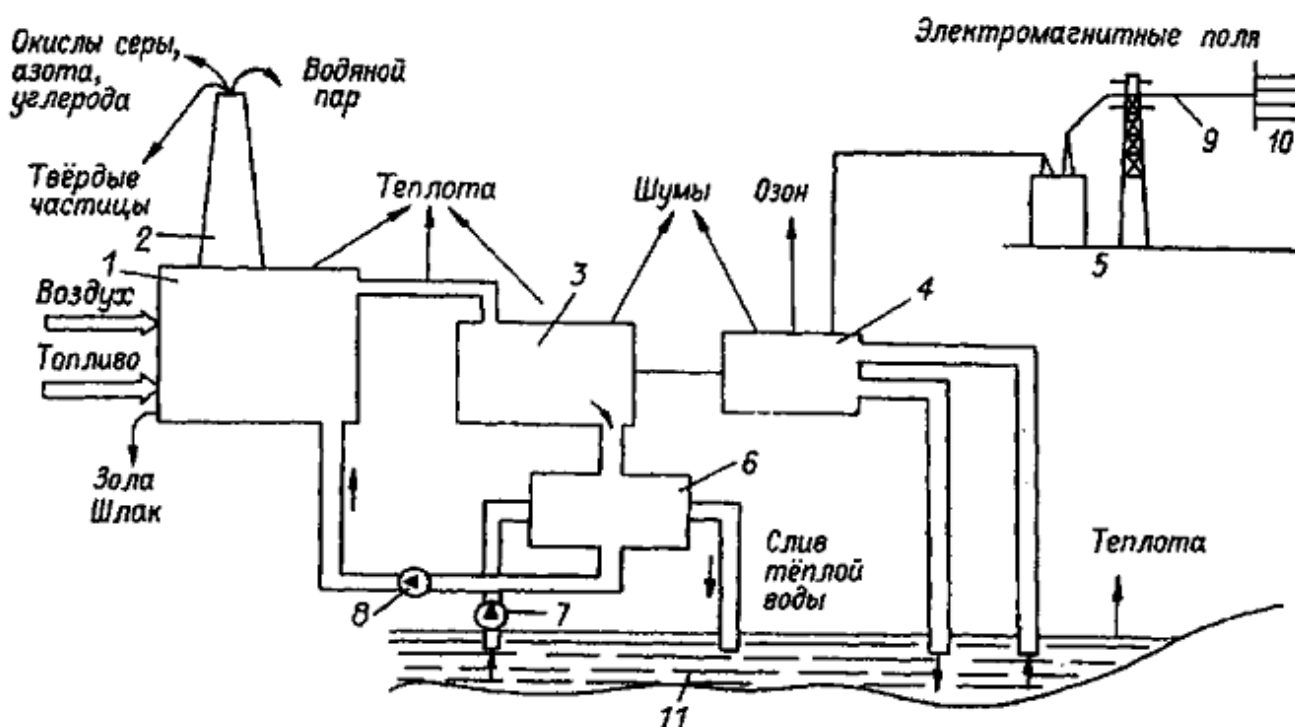
<sup>1</sup> В типовой схеме подготовки нефти к переработке предусмотрены отделение от нефти газа и его утилизация. Попутные газы нефти являются ценным сырьем для производства синтетического каучука и резинотехнических изделий, полиэтилена, этилового спирта и тд.

Отрицательное влияние выбросов на нефтеперерабатывающем заводе мощностью 12 млн. т. в год может проявляться на расстоянии до 20 км от предприятия.

По сравнению с нефтеперерабатывающими предприятиями **нефтехимические производства** выбрасывают в атмосферу самые разнообразные вещества, среди которых можно выделить *предельные, непредельные и ароматические углеводороды, метанол, органические кислоты и ангидриды, оксиды серы, азота, углерода, сероводород и сероуглерод.*

Наиболее опасная обстановка возникает на нефтехимических заводах в аварийных ситуациях. Например, катастрофа на нефтехимическом заводе в г. Бхопал (Индия) в 1984 г. Привела к гибели 5 тыс. человек и серьезному нарушению здоровья (потеря зрения, психические расстройства и другие заболевания) у более чем 200 тыс. жителей в результате выброса и распространения газового облака, содержащего метилизоцианат (используется в производстве гербицидов).

## 1.5 ВОЗДЕЙСТВИЕ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ (ТЭС) НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ



1 – котел; 2 – дымовая труба; 3 – турбина; 4 – генератор; 5 – подстанция; 6 – конденсатор; 7 – циркуляционный насос; 8 – конденсатный насос; 9 – линия электропередачи; 10 – потребители электроэнергии; 11 – водоем.

Рисунок 2 – Схема воздействия ТЭС на окружающую среду

В целом можно выделить следующие основные виды негативных воздействий ТЭС на окружающую среду:

- загрязнение атмосферы взвешенными частицами (сажа, зола) и химическими веществами ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$  и т.д.);
- «парниковый эффект»;

- гигантское потребление кислорода, снижающее его концентрацию в атмосфере;
- загрязнение литосферы твердыми отходами (шлаки, золоотвалы), осаждение на поверхности почвы вредных выбросов и миграция их в глубь литосферы;
- непомерное возрастание потребления воды, загрязнение «сточными водами»;
- «кислотные дожди»;
- «тепловые выбросы»;
- другие негативные воздействия, в том числе шумовое и электромагнитное.

Теплоэнергетика является источником поступления в окружающую среду более 300 видов веществ, среди которых основную долю составляют:

- диоксид серы;
- оксиды углерода;
- оксиды азота;
- пыль различного происхождения.

Перечень веществ, выбрасываемых предприятиями теплоэнергетики, при работе на разных видах ископаемого топлива представлен в таблице 5.

Таблица 5. Перечень веществ, выбрасываемых предприятиями теплоэнергетики при работе на разных видах ископаемого топлива.

Вид топлива	Газообразные вещества	Аэрозоли	Элементы примеси
Уголь	NO, NO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , SO <sub>3</sub> , CO <sub>2</sub> , HCl, HF, Hg (пары), As(пары)– Донецкое месторождение очень богато мышьяком, H <sub>2</sub> S, NH <sub>3</sub>	Летучая зола, сажа; формальдегид, бензапирен; <sup>40</sup> K, <sup>226</sup> Ra, <sup>232</sup> Th(торий),	As, Cd, Pb, Ti, Cr, Na, Ni, V, Cu, Zn, Mn, Mo, Sb, SiO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , TiO <sub>2</sub> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
Мазут	NO, NO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , SO <sub>3</sub> , CO, CO <sub>2</sub> , Hg (пары), углеводороды	Зола (V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ), формальдегид, бензапирен, сажа (в золе есть частицы недогоревшего топлива, в саже этих частиц нет)	As, Cd, Pb, Ti, Cr, Na, Ni, V, Cu, Zn, Mn, Mo, Sb – эти частицы обычно удаляются с поверхности котлов при чистке
Газ	NO, NO <sub>2</sub> , CO, CO <sub>2</sub> , следы SO <sub>2</sub> , углеводороды	Углеводороды	—

• **Аэрозоли** – это дисперсные системы, состоящие из дисперсионной среды (газа) и дисперсной фазы. По агрегатному состоянию делятся на **туманы** (системы с жидкой дисперсной фазой), **пыли** (системы с твердыми частицами размером более 10 мкм), **дымы** (системы, размеры твердых частиц в которых находятся в пределах 0,001–10 мкм).

Из предложенного перечня веществ видно, что основными компонентами, выбрасываемыми в атмосферу при сжигании различных видов топлива, действительно, являются — оксиды азота, серы, углерода, а также сажа и зола. При сгорании, особенно при неполном, имеют место выбросы углеводородов (типа метана, этана), по-

лициклических углеводородов (в том числе бенз(а)пирена (C<sub>20</sub>H<sub>12</sub>)), формальдегида (НСОН), оксида ванадия (V).

Количественное содержание перечисленных компонентов приведено в таблице 6.

Таблица 6. Годовые выбросы ТЭС на органическом топливе мощностью 1000 МВт

Вид топлива	Вещество, т/год							
	NO <sub>2</sub>	CO	SO <sub>2</sub>	Твердые частицы	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Бензапирен, C <sub>20</sub> H <sub>12</sub>	Формальдегид НСОН	Всего
Природный газ	13 888	14 681	-	2	-	0,0009	-	28 564
Мазут (топочный)	23 242	27 975	153 786 (1)	1 090	2 150	0,018	1 200	209 442
Уголь (бурый)	45 114	530 405	269 864 (2)	134 366	-	0,13	2 850	982 600

В выбросах ТЭС также присутствуют элементные примеси, в числе которых весьма токсичные – тяжелые металлы<sup>2</sup> и естественные радионуклиды.

Таким образом, наиболее экологически несовершенным видом топлива является уголь, т.к. при его сжигании образуется большой ассортимент вредных выбросов,

<sup>2</sup> **Тяжёлые металлы** — группа химических элементов со свойствами металлов (в том числе и полуметаллы) и значительным атомным весом либо плотностью. Известно около сорока различных определений термина тяжелые металлы, и невозможно указать на одно из них, как наиболее принятое. Соответственно, список тяжелых металлов согласно разным определениям будет включать разные элементы. Используемым критерием может быть атомный вес свыше 50, и тогда в список попадают все металлы, начиная с ванадия, независимо от плотности. Другим часто используемым критерием является плотность, примерно равная или большая плотности железа (8 г/см<sup>3</sup>), тогда в список попадают такие элементы как свинец, ртуть, медь, кадмий, кобальт, а, например, более легкое олово выпадает из списка. Существуют классификации, основанные и на других значениях пороговой плотности или атомного веса. Некоторые классификации делают исключения для благородных и редких металлов, не относя их к тяжелым, некоторые исключают нецветные металлы (железо, марганец). Термин тяжелые металлы чаще всего рассматривается не с химической, а с медицинской и природоохранной точек зрения и, таким, образом, при включении в эту категорию учитываются не только химические и физические свойства элемента, но и его биологическая активность и токсичность, а также же объем использования в хозяйственной деятельности.

#### **Загрязнение тяжелыми металлами**

Среди разнообразных загрязняющих веществ тяжёлые металлы (в том числе ртуть, свинец, кадмий, цинк, мышьяк) и их соединения выделяются распространённостью, высокой токсичностью, многие из них — также способностью к накоплению в живых организмах. Они широко применяются в различных промышленных производствах, поэтому, несмотря на очистительные мероприятия, содержание соединения тяжелых металлов в промышленных сточных водах довольно высокое. Они также поступают в окружающую среду с бытовыми стоками, с дымом и пылью промышленных предприятий. Многие металлы образуют стойкие органические соединения, хорошая растворимость этих комплексов способствует миграции тяжелых металлов в природных водах. К тяжелым металлам относят более 40 химических элементов, но при учете токсичности, стойкости, способности накапливаться во внешней среде и масштабов распространения токсичных соединений, контроля требуют значительно меньшее число элементов.

по сравнению с другими видами топлива. Но **уголь** – самое распространенное ископаемое топливо на нашей планете. Специалисты считают, что его запасов хватит на 400–500 лет.

**Жидкое топливо** (мазут, бензин, керосин) более «экологично», чем твердое.

При этом полностью исключается проблема золоотвалов, которые занимают значительные территории и являются источником постоянного загрязнения атмосферы в районе станции из-за уноса части золы ветрами. Однако перевод установок на жидкое топливо лишь незначительно уменьшает выбросы оксидов серы и азота.

В продуктах сгорания жидких видов топлива отсутствует и летучая зола.

**Газовое топливо** наиболее «экологичное».

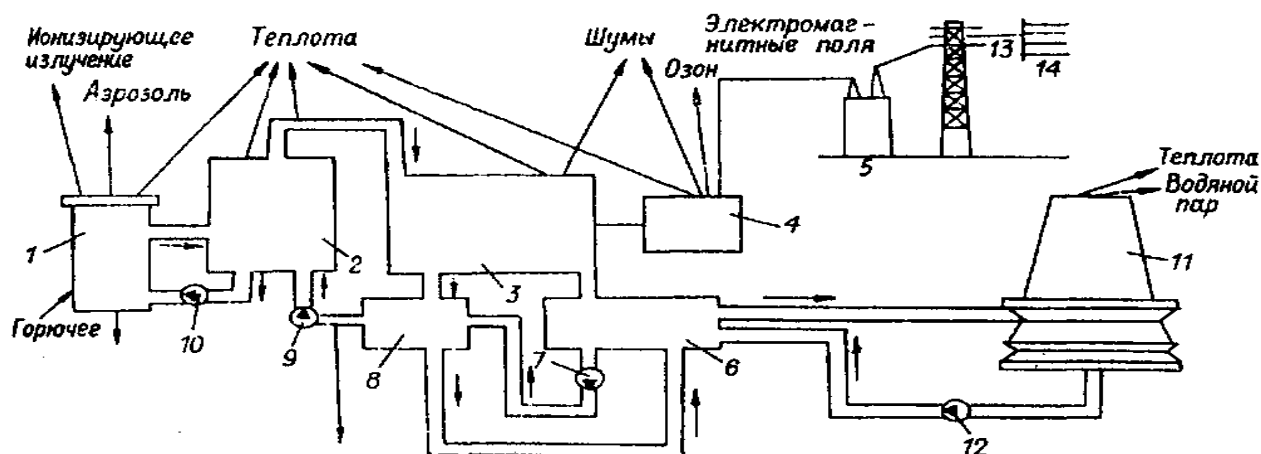
При сжигании природного газа существенными загрязнителями атмосферы являются оксиды азота и монооксид углерода (СО). Оксиды азота, однако, практически исключаются при применении экологически чистых технологий его сжигания.

## 1.6 ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ОГРАНИЧЕНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

АЭС, являющаяся наиболее современным видом электростанций, имеет ряд существенных преимуществ перед другими видами электростанций:

**1) При нормальных условиях функционирования они практически не загрязняют окружающую среду, хотя и являются источниками воздействия четырех видов:**

1. Радиационного;
2. Химического;
3. Теплового (тепловлажностного);
4. Воздействия, обусловленного процессом строительства и урбанизации региона АЭС, появлением в регионе большого количества нового населения.



1 – реактор; 2 – парогенератор; 3 – турбина; 4 – генератор; 5 – подстанция; 6 – конденсатор; 7 – циркуляционный насос; 8 – регенеративный подогреватель; 9 – питательный насос; 10, 12 – циркуляционные насосы; 11 – градирни; 13 – линия электропередачи; 14 – потребители.

Рисунок 3 – Схема влияния АЭС на окружающую среду



*Радиационное и химическое воздействия* обусловлены поступлением с АЭС радиоактивных и химических веществ (в частности тяжелых металлов<sup>3</sup>) с газоаэрозольным выбросом и с жидкими стоками.

*Тепловое воздействие* – это главным образом воздействие сбросного (избыточного) тепла на экосистему водоема охладителя.

*Тепловлажностное воздействие* связано с эксплуатацией градирен.

*Урбанизационное воздействие и воздействие населения* – это строительство дорог, развитие автотранспорта, вытаптывание и засорение лесов, лугов и водоемов, интенсификация сельскохозяйственного производства в связи с увеличением в регионе потребителей его продукции.

Радиоактивные поступления и радиационное воздействие на население и природные комплексы региона незначительны во все время нормальной работы АЭС.

Дело в том, что средняя доза излучения от радионуклидов, поступивших за пределы АЭС –  $25 \cdot 10^5$  зв/год (25 мбэр/год), сама незначима, так как не превышает годовых колебаний средней дозы естественного фона. К маю 1986 г. 400 энергоблоков, работавших в мире (в настоящее время в мире насчитывается 500 энергоблоков и 100 энергоблоков планируют построить) и дававшие более 17% электроэнергии, увеличили природный фон радиактивности не более чем на 0,02 %.

Кроме того, радионуклиды стационарного происхождения (т.е. поступившие с АЭС в окружающую среду) можно достоверно обнаружить в объектах окружающей среды не далее чем на расстоянии 2–3 км от АЭС и иногда в атмосферном воздухе – на несколько большем расстоянии, но не более 4–5 км.

Стационарные радионуклиды, поступающие в водоем-охладитель, обнаруживаются в основном в донных отложениях, вблизи места выпуска жидких стоков, иногда в рыбах, высшей водной растительности.

Нет никакой «тритиевой» проблемы на АЭС и проблемы  $C^{14}$  (источники  $\beta$ -излучения).

---

<sup>3 3</sup> **Тяжёлые металлы** — группа химических элементов со свойствами металлов (в том числе и полуметаллы) и значительным атомным весом либо плотностью. Известно около сорока различных определений термина тяжелые металлы, и невозможно указать на одно из них, как наиболее принятое. Соответственно, список тяжелых металлов согласно разным определениям будет включать разные элементы. Используемым критерием может быть атомный вес свыше 50, и тогда в список попадают все металлы, начиная с ванадия, независимо от плотности. Другим часто используемым критерием является плотность, примерно равная или большая плотности железа ( $8 \text{ г/см}^3$ ), тогда в список попадают такие элементы как свинец, ртуть, медь, кадмий, кобальт, а, например, более легкое олово выпадает из списка. Существуют классификации, основанные и на других значениях пороговой плотности или атомного веса. Некоторые классификации делают исключения для благородных и редких металлов, не относя их к тяжелым, некоторые исключают нецветные металлы (железо, марганец). Термин тяжелые металлы чаще всего рассматривается не с химической, а с медицинской и природоохранной точек зрения и, таким, образом, при включении в эту категорию учитываются не только химические и физические свойства элемента, но и его биологическая активность и токсичность, а также же объем использования в хозяйственной деятельности.

К тяжелым металлам относят более 40 химических элементов, но при учете токсичности, стойкости, способности накапливаться во внешней среде и масштабов распространения токсичных соединений, контроля требуют значительно меньшее число элементов.

Измерить дозовые нагрузки на индивидуумов из населения нельзя, а расчет по известной мощности выброса приводит к значениям, равным долям процента допустимой дозы.

При нарушении нормального режима работы АЭС нельзя исключать значимых радиационных воздействий на население и природные объекты, даже в том случае, когда при нарушении нормального режима работы АЭС радиоактивные поступления за ее пределы значительно меньше Чернобыльских (на модернизированных АЭС и АЭС новых поколений радиоактивное загрязнение окружающей среды, сравнимое с чернобыльским, исключено).

При нормальной работе АЭС доминирует все-таки **тепловое воздействие, тепловлажностное и воздействие, связанное с урбанизацией региона.**

**2) АЭС не требуют привязки к источнику сырья**, т.к. транспортировка сырья не требует существенных затрат в связи с малыми объемами (0,5 кг ядерного топлива – урана 235 и плутония 239 – позволяет получать столько же энергии, сколько выделяется при сжигании 1000 т. каменного угля).

**3) Новые энергоблоки имеют мощность приблизительно равную мощности средней ГЭС, однако коэффициент использования установленной мощности на АЭС (80%) значительно превышает этот показатель у ГЭС или ТЭС.**

Однако, несмотря на все вышеперечисленные преимущества, повседневная работа АЭС сопровождается рядом трудностей:

1. Существуют проблемы с захоронением радиоактивных отходов (коэффициент использования топлива составляет около 5%, остальное идет в отходы). Для вывоза со станций сооружаются контейнеры с мощной защитой и системой охлаждения. Захоронения производится в земле, на больших глубинах в геологически стабильных пластах.

2. Сброс тепла в окружающую среду от АЭС в 1,5–2 раза больше, чем от ТЭС, из-за разности в коэффициентах полезного действия (КПД АЭС  $\approx$  30–31%, тогда как КПД ТЭС 35–37%). Наибольшую опасность представляет охлаждающая АЭС вода, сбрасываемая в водоемы при температуре 40–45°C, что приводит к изменению теплового режима рек и озер.

3. Ликвидация самих АЭС после окончания допустимых сроков эксплуатации

источник ионизирующего излучения

стоимость таких ликвидационных работ составляет от 1/6 до 1/3 от стоимости самих АЭС.

Кроме того:

- на сооружение АЭС требуется затратить примерно 25% электроэнергии от того объема, который затем АЭС выработает за 25...30 лет своей работы, а далее возникает весьма сложная проблема демонтажа и захоронения реакторов.

- По подсчетам экономистов, электроэнергия, выработанная на АЭС, в три раза дороже, чем выработанная на ТЭС, работающей на природном газе.

Итак, по экологическим соображениям атомная энергетика не может и не должна играть роль масштабной, ее уровень, видимо, не должен превышать уже существующий.

Основным направлением в обеспечении безопасности АЭС является их размещение под землей вместо защиты их реакторов прочными оболочками. Мировой положительный опыт в этом плане уже накоплен, поскольку под землей были размещены ядерные реакторы в Красноярске-26 (Россия), Чузе (Франция), Халдене (Норвегия), Агесте (Швеция), Люцерне (Швейцария), Гамболдте (США).

## 1.7 ВОЗДЕЙСТВИЕ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ (ГЭС) НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

Технологический процесс производства электроэнергии с помощью гидравлических турбин не дает значительного отрицательного воздействия на природную среду.

Однако реализация этого процесса связана со специфическими и зачастую с довольно крупномасштабными изменениями в природной системе прилегающей территории.

Воздействие ГЭС на природные условия затрагиваемых территорий может быть как отрицательным, так и положительным.

**Положительное воздействие** состоит в следующем:

1. С помощью плотин и водохранилищ осуществляется орошение земель, защита плодородных угодий и населенной местности в целом от наводнений катастрофического характера (так как водохранилища – это регуляторы стока рек).

2. Существенно улучшаются местные условия судоходства на реке, углубляется фарватер, затопляются пороги.

3. Создание водохранилищ позволяет интенсифицировать рыбоводческое хозяйство, создает возможности для разведения озерных пород рыб, массового отдыха.

**Отрицательное воздействие** на окружающую среду может быть *прямым или косвенным*.

*Прямое воздействие:*

1. Постоянное и временное затопление земель, большая часть которых относится к высокопродуктивным сельскохозяйственным и лесным угодьям.

2. В зоне водохранилища резко уменьшается проточность, турбулентность воды, создаются условия для создания застойных зон.

3. Наличие плотины является серьезным, практически непреодолимым препятствием для нерестового хода рыбы, а также, несмотря на улучшающиеся местные судоходные условия, и для развития водного транспорта (из-за наличия бревен на поверхности воды).

*Косвенное воздействие:*

1. Затопленные плодородные почвы и растительность обогащают воду большим количеством питательных элементов, что создает благоприятные условия

для роста и развития планктона. Рост этой продукции до известного предела соответствует интересам рыбного хозяйства. Правда по прошествии некоторого времени наблюдается цепная реакция:

Текущая вода → водохранилище → накопление химических веществ + тепловое загрязнение → зарастание водоема (цветение) → обогащение органикой → обескислороживание → порча воды → болезни рыб → потеря пищевых или вкусовых свойств воды и продуктов промысла.

Вода может стать непригодной (или трудно очищаемой) и для водоснабжения, особенно в питьевых и коммунальных целях.

2. Очистка будущего ложа водохранилища от леса также приводит к качественному ухудшению состава воды после затопления водохранилища. Происходит это из-за образования фенола и других токсичных органических веществ при подводном гниении древесины (дело в том, что по экономическим соображениям полная вырубка лесов «нецелесообразна» и к тому же отодвигает сроки ввода ГЭС на несколько лет (только при строительстве Усть-Илимской ГЭС под водой оказалось более 20 млн м<sup>3</sup> древесины). Вот и увеличивается в воде и содержание фенола, и других органических веществ → в результате мы снова имеем обескислороживание воды, рост ее токсичности, и как следствие – гибель рыб и непригодность воды в питьевых целях).

3. К косвенным воздействиям относится локальное изменение климата, которое проявляется в повышении влажности воздуха и образовании частых туманов.

Зачитать отрывок:

«После нескольких лет эксплуатации приходится расплачиваться за «экономия»: лес гниет, водоемы становятся непригодными для всего живого и для судоходства (из-за появления бревен на поверхности). После запуска первой ГЭС Енисей перестал замерзать на десятки километров ниже плотины, следовательно изменились и условия обитания в этом районе. Другим стал и климат: сухой и здоровый воздух побережья быстро сменился влажным и туманным. Не вырубленный на дне Красноярского моря лес постепенно превращает водохранилище в зеленое цветущее месиво. При строительстве Красноярской ГЭС в плотине не были предусмотрены рыбоприемники и рыбоходы, что привело к прекращению нереста рыбы ценных пород в верхнем течении Енисея. А ведь Енисей – равнинная река, не нуждающаяся в плотинах, требующая особого режима охраны природы.»

Здесь необходимо подчеркнуть, что многие из перечисленных негативных явлений – следствие не реализации самой идеи ГЭС, а неправильного проектирования, строительства, и неправильного режима эксплуатации ГЭС.

## **1.8 ДИОКСИД СЕРЫ (SO<sub>2</sub>) И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА ЖИВЫЕ ОРГАНИЗМЫ И ЗАГРЯЗНЕНИЕ ОС**

**ДИОКСИД СЕРЫ (SO<sub>2</sub>)** (сернистый газ, сернистый ангидрид) – бесцветный газ с резким запахом (определяющий запах дымовых газов).

К природным источникам  $\text{SO}_2$  относятся в первую очередь действующие вулканы, лесные пожары, морская пена и микробиологические превращения серосодержащих соединений.

Диоксид серы антропогенного происхождения образуется:

1) при сжигании топлива на ТЭС, заводах, фабриках, для обогрева помещений, в двигателях внутреннего сгорания (сера, входящая в состав топлива сгорает с образованием оксида:  $\text{S} + \text{O}_2 = \text{SO}_2$ , в меньшей мере происходит дальнейшее сжигание:  $\text{S} + \frac{1}{2} \text{O}_2 = \text{SO}_3$ );

2) в металлургических производствах (при выплавке меди, свинца, цинка из сульфидных руд),

3) в производстве серной кислоты

4) при переработке нефти.

Производство тепловой и электрической энергии является основным антропогенным источником  $\text{SO}_2$ . Общее количество диоксида серы антропогенного происхождения в развитых промышленных странах превышает количество природного  $\text{SO}_2$  в 20–30 раз.

Содержание сернистого газа, как и пыли, в выбросах ТЭС зависит от вида топлива, его характеристик. Количество выбрасываемого  $\text{SO}_2$  в атмосфере определяется состоянием сероочистки. Содержание серы в мазутах, используемых ТЭС в РБ, составляет 1,0–3%. Серосодержание твердых топлив, разных углей изменяется в широких пределах от 0,2–0,4% до 5 % и более.

Время пребывания  $\text{SO}_2$  в атмосфере в среднем исчисляется двумя неделями. Этот промежуток времени слишком мал, чтобы газ мог распространиться в глобальном (земном) масштабе. Поэтому проблема загрязнения атмосферы сернистым газом возникает в первую очередь в высокоразвитых промышленных странах и у их ближайших соседей.

В атмосфере сернистый газ претерпевает ряд химических превращений, важнейшее из которых – образование серной кислоты ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). Серная кислота в свою очередь разрушает легочную ткань человека и животных. Особенно четко эта связь прослеживается при анализе детской легочной патологии и степени концентрации диоксида серы в атмосфере крупных городов.

Капли серной кислоты вызывают ожоги листьев, хвои, сельскохозяйственных растений.

В присутствии серной кислоты ускоряется электрохимическая коррозия металлов (железа, меди, цинка, алюминия), разрушение строений с известковой кладкой, памятников зодчества, произведений искусства, изделий из мрамора, известняка, штукатуренных поверхностей, стекол, бетона и других строительных материалов. В большей степени эти разрушения связаны с действием кислотных дождей, т.е. кислот, образующихся не на влажной поверхности материалов, а непосредственно в атмосферном воздухе.

Под воздействием  $\text{SO}_2$  разрушаются и многие органические материалы – бумага (книги, документы), ткани (хлопковые, вискозные, нейлоновые), кожа, резина и красители. С выбросами  $\text{SO}_2$  в атмосферу связано еще и такое явление как смог «Лондонского типа».

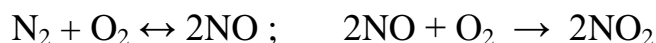
## 1.9 ОКСИДЫ АЗОТА (NO<sub>x</sub>) И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ЖИВЫЕ ОРГАНИЗМЫ И ЗАГРЯЗНЕНИЕ ОС

**ОКСИДЫ АЗОТА.** Оксиды азота (NO и NO<sub>2</sub>), как и SO<sub>2</sub>, относятся к основным загрязнителям атмосферы. Они вызывают как локальные, так и глобальные изменения в окружающей среде. Концентрация этих газов в чистом воздухе невелика. Для NO<sub>2</sub> она составляет менее  $2 \cdot 10^{-6}$  об%. Монооксид азота NO присутствует в воздухе лишь в следовых количествах. Первоначально образующийся монооксид азота NO окисляется в диоксид NO<sub>2</sub> кислородом воздуха:  $2NO + O_2 \rightarrow NO_2$ .

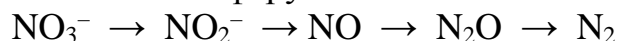
Монооксид NO и диоксид NO<sub>2</sub> азота в экологической литературе часто обозначают общей формулой NO<sub>x</sub>.

В несколько большем количестве по сравнению с NO и NO<sub>2</sub> в воздухе содержится оксид диазота N<sub>2</sub>O. Его концентрация равна  $5 \cdot 10^{-5}$  об %.

*Естественными источниками* оксидов азота в атмосфере являются лесные пожары, грозовые разряды, при которых образуется монооксид NO, окисляющийся затем в диоксид NO<sub>2</sub>:



Оксиды азота, образующиеся в процессах микробиологической денитрификации в почве, также выделяются в атмосферу:



Основное количество оксида диазота N<sub>2</sub>O выделяют азотсодержащие соединения почв, N<sub>2</sub>O образуется также в процессах сжигания биомассы и при использовании азотных удобрений.

Природные источники дают до 770 млн. т NO<sub>x</sub> в год (в пересчете на NO<sub>2</sub>).

Основным *антропогенным источником* оксидов азота (NO и NO<sub>2</sub>) являются процессы высокотемпературного сгорания различных видов топлива (природного газа, угля, бензина, мазута) на тепловых электростанциях, промышленных установках и автомобильных двигателях. Примерно 90% всех выбросов оксидов азота в атмосферу связаны с сжиганием топлива, в процессе которого протекают реакции двух типов: 1) реакция между O<sub>2</sub> воздуха и азотом, содержащимся в топливе, 2) реакция между O<sub>2</sub> воздуха и азотом, содержащимся в воздухе. Ответственность за поступление оксидов азота в атмосферу несут и некоторые отрасли химической промышленности, в частности производители азотной кислоты («лисьи хвосты» над трубами), серной кислоты нитрозным методом, взрывчатых веществ. Антропогенные источники выделяют до 60 млн. т. оксидов азота в год (в пересчете на NO<sub>2</sub>).

В большинстве развитых стран главным антропогенным источником оксидов азота остается автомобильный транспорт, на его долю в среднем приходится 40–50% выбросов.

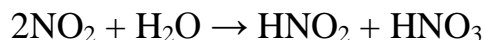
В отличие от сернистого газа основное количество оксидов азота в атмосфере имеет природное происхождение. На долю антропогенных источников приходится только около 10% общей эмиссии<sup>4</sup> NO, NO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, в то время как около 90% SO<sub>2</sub> в атмосфере является продуктом человеческой деятельности.

---

<sup>4</sup> Эмиссия – выбросы, поступления в атмосферу.

Считается, что оксиды азота сохраняются в атмосфере лишь несколько суток. Однако, несмотря на такую небольшую продолжительность жизни (вспомним, что SO<sub>2</sub> сохраняются в атмосфере до двух недель) оксиды азота, вступая в разнообразные химические реакции<sup>5</sup>, дольше остаются в атмосфере и переносятся на более значительные расстояния от источника, чем соединения серы.

Во влажном воздухе диоксид азота вступает в реакцию с H<sub>2</sub>O с образованием азотистой и азотной кислот:



Азотистая и азотная кислота вносят свой вклад в образование кислотных дождей.

Оксиды азота играют также большую роль в разложении озона.

Оксиды азота играют большую роль в возникновении фотохимического смога, называемого также фотохимическим туманом. Это смог был впервые обнаружен в 1944 г. над Лос-Анджелесом (США), наиболее часто наблюдался там в последующие годы, поэтому его называют смогом лос-анджелесского типа.

Оксид диазота N<sub>2</sub>O, образующийся главным образом естественным путем, безвреден для человека. Он представляет собой бесцветный газ со слабым запахом и сладковатым вкусом. Вдыхание небольших количеств N<sub>2</sub>O приводит к притуплению болевой чувствительности, вследствие чего этот газ иногда в смеси с кислородом применяют для наркоза. В малых количествах N<sub>2</sub>O вызывает чувство опьянения (отсюда название «веселящий газ»). N<sub>2</sub>O – один из газов, вызывающих парниковый эффект.

Оксид азота NO и диоксид азота NO<sub>2</sub> в атмосфере встречаются вместе, поэтому чаще всего оценивают их совместное воздействие на организм человека. Только вблизи от источника выбросов отмечается высокая концентрация NO. При сгорании топлива в автомобилях и в тепловых электростанциях примерно 90% оксидов азота образуется в форме монооксида азота. Оставшиеся 10% приходятся на диоксид азота. Однако в ходе химических реакций значительная часть NO превращается в NO<sub>2</sub> – гораздо более опасное соединение.

Монооксид азота NO представляет собой бесцветный газ. Он не раздражает дыхательные пути, и поэтому человек может его не почувствовать. При вдыхании, NO как и CO, связывается с гемоглобином крови. При этом образуется нестойкое нитрозосоединение, которое быстро переходит в метгемоглобин, при этом Fe<sup>2+</sup> переходит в Fe<sup>3+</sup>. Ион Fe<sup>3+</sup> не может обратимо связывать O<sub>2</sub> и таким образом выходит из процесса переноса кислорода. Концентрация метгемоглобина в крови 60–70% считается летальной. Но такое предельное значение может возникнуть только в закрытых помещениях, на открытом воздухе это невозможно.

По мере удаления от источника выброса все большее количество NO превращается в NO<sub>2</sub> – бурый, обладающий характерным неприятным запахом газ. Вдыхание ядовитых паров NO<sub>2</sub> может привести к серьезному отравлению. Он вызывает сенсорные, функциональные и патологические эффекты. Рассмотрим некоторые из них. К сенсорным эффектам можно отнести обонятельные и зрительные ответы организ-

<sup>5</sup> Например:

NO<sub>2</sub> → NO + O, эта реакция идет под влиянием солнечного света (область длин волн менее 430 нм)

O + O<sub>2</sub> + M → O<sub>3</sub> + M, где M – инертная частица.

NO + O<sub>3</sub> → NO<sub>2</sub> + O<sub>2</sub>

ма на воздействие  $\text{NO}_2$ . Даже при малых концентрациях, составляющих всего  $0,23 \text{ мг/м}^3$ , человек ощущает присутствие этого газа. *Эта концентрация является порогом обнаружения  $\text{NO}_2$* . Однако способность обнаруживать диоксид азота пропадает после 10 мин вдыхания, но при этом люди жалуются на чувство сухости и першения в горле. Хотя и эти ощущения исчезают при продолжительном воздействии газа в концентрации, в 15 раз превышающей порог обнаружения. Таким образом,  $\text{NO}_2$  *ослабляет обоняние*. Также диоксид азота *ослабляет и ночное зрение* – способность глаз адаптироваться к темноте.

Этот эффект наблюдается при концентрации  $0,14 \text{ мг/м}^3$ , что ниже порога обнаружения.

Функциональным эффектом, вызываемым диоксидом азота, является повышенное сопротивление дыхательных путей. Иными словами,  $\text{NO}_2$  вызывает увеличение усилий, затрачиваемых на дыхание. Эта реакция наблюдалась у здоровых людей при концентрации  $\text{NO}_2$  всего  $0,056 \text{ мг/м}^3$ , что в четыре раза ниже порога обнаружения.

Патологические эффекты проявляются в том, что  $\text{NO}_2$  делает человека более восприимчивым к патогенам, вызывающим болезни дыхательных путей. У людей, подвергшихся воздействию высоких концентраций диоксида азота, чаще наблюдаются *катар верхних дыхательных путей, бронхиты, круп и воспаление легких*.

Диоксид азота сам по себе может быть причиной заболеваний дыхательных путей. Попадая в организм человека,  $\text{NO}_2$ , при контакте с влагой образует азотистую и азотную кислоты, которые разъедают стенки альвеол легких. При этом стенки альвеол и кровеносных капилляров становятся настолько проницаемыми, что пропускают сыворотку крови в полость легких. В этой жидкости растворяется вдыхаемый воздух, образуя пену, препятствующую дальнейшему газообмену. Возникает *отек легких*, который может привести к смерти.

Некоторые исследователи считают, что в районах с более высоким содержанием в атмосфере диоксида азота наблюдается повышенная смертность от сердечных и раковых заболеваний.

Отрицательное биологическое воздействие  $\text{NO}_x$  на растения проявляется в обесцвечивании листьев (окисляется хлорофилл), увяданием цветков, прекращении плодоношения и роста. Такое действие объясняется образованием кислот при растворении оксидов азота в межклеточной и внутриклеточной жидкостях.

Разрушительное действие  $\text{NO}_2$  на растения усиливается в присутствии диоксида серы  $\text{SO}_2$ . Это подтверждено на опытах. Эти газы обладают синергизмом, и в атмосфере они часто присутствуют вместе.

На отечественных ТЭС дымовые газы не подвергаются очистке от оксидов азота. В то же время существует множество малозатратных мероприятий, позволяющих технологическими методами существенно снизить уровень их выбросов в атмосферу.



## 1.10 ОКСИДЫ УГЛЕРОДА И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ЖИВЫЕ ОРГАНИЗМЫ И ЗАГРЯЗНЕНИЕ ОС

**Монооксид углерода (II) – CO.** Этот газ, называемый также «угарным газом», относится к основным загрязнителям воздуха.

Небольшие количества CO природного происхождения образуются в результате вулканической деятельности и окисления метана в атмосфере.

Антропогенными источниками монооксида углерода является автотранспорт, промышленные печи и котельные (из-за неполного сгорания топлива). Среднее время пребывания CO в атмосфере составляет примерно 6 месяцев.

CO – бесцветный, не имеющий запаха газ, поэтому его трудно обнаружить органами чувств. Он вдыхается вместе с воздухом или табачным дымом и, поступая в кровь, конкурирует с кислородом за молекулы гемоглобина (молекулы монооксида углерода присоединяются к гемоглобину в 210 раз легче, чем кислород. Гемоглобин, соединившийся с CO, называется карбоксигемоглобином. Высокая его концентрация в крови человека (60–70%) вызывает летальный исход.

Содержание карбоксигемоглобина в крови человека, выкуривающего пачку сигарет в день, составляет в среднем 4,5% (тогда как у некурящего человека в крови содержится всего 0,3–0,5%). Исследования, проведенные с людьми, страдающими стенокардией, показали, что даже при уровне карбоксигемоглобина в крови 2% состояние больных стенокардией ухудшается, а при содержании его в количестве 3% приступы стенокардии начинаются быстрее и происходят дольше обычного. Причина заключается в том, что монооксид углерода уменьшает перенос кислорода к тканям, а ткань, которая особенно чувствительна к недостатку кислорода, – это миокард (сердечная мышца).

Итак, монооксид углерода представляет опасность для человека прежде всего потому, что может связываться с гемоглобином. Но он опасен также тем, что участвует в образовании смога. Кроме того, CO может образовывать с металлами высокотоксичные соединения – *карбонилы* (напр,  $\text{Fe}(\text{CO})_5$ ), представляющие собой летучие весьма ядовитые жидкости.

Ежегодно доля выбросов CO от антропогенных источников возрастает на 20–30%. Однако суммарная концентрация его в атмосфере увеличивается медленно, так как в природе происходят процессы связывания CO путем окисления в  $\text{CO}_2$  (накоплению CO в атмосфере препятствуют высшие растения, водоросли и особенно микроорганизмы почвы).

**Диоксид углерода или углекислый газ ( $\text{CO}_2$ )** – продукт сгорания углеродсодержащих веществ. Обычно концентрация этого газа в воздухе не превышает 0,03 %, что не оказывает влияние на человека. При содержании  $\text{CO}_2$  в воздухе более 3% у людей учащается дыхание, сердцебиение, повышается давление крови, замедляется пульс и т.д. Большие концентрации  $\text{CO}_2$  (свыше 10%) вызывают бурную отдышку и паралич дыхательного центра.

Увеличение количества сжигаемого природного топлива с развитием индустриализации многих стран, особенно в течение последних 100–200 лет, привело к заметному повышению содержания  $\text{CO}_2$  в атмосфере. Попавший в атмосферу  $\text{CO}_2$

находится в ней в среднем 2–4 года, и за это время он распространяется повсеместно по всей земной поверхности.

Влияние CO<sub>2</sub> проявляется прежде всего в его способности поглощать инфракрасные лучи, вызывать так называемый *парниковый эффект*, т.е. потепление климата на Земле. При нынешних темпах использования органических топлив в ближайшие 50 лет прогнозируется повышение среднегодовой температуры на планете в пределах от 1,5°C (близ экватора) до 5°C (в высоких широтах).

В то же время из-за увеличения запыленности атмосферного воздуха рост содержания CO<sub>2</sub> в нем не приводит к повышению его температуры, а скорее создает условия для его понижения.

## 1.11 ТВЕРДЫЕ ВЫБРОСЫ И БЕНЗАПИРЕН И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ЖИВЫЕ ОРГАНИЗМЫ И ЗАГРЯЗНЕНИЕ ОС

**Твердые выбросы.** Промышленные пыли по происхождению подразделяются:

- 1) **Механическую** – образуется в результате измельчения продуктов в ходе технологических процессов.
- 2) **Возгоны**<sup>6</sup> – пыль, образующаяся при объемной конденсации паров веществ при охлаждении газа.
- 3) **Летучая зола** – пыль в виде несгораемого остатка топлива, образующаяся из его минеральных примесей при горении, содержащаяся в дымовых газах во взвешенном состоянии.
- 4) **Промышленная сажа** – пыль в виде твердого высокодисперсного углерода, образующаяся при неполном сгорании или термическом разложении углеводородов, входящая в состав промышленного выброса.

Основное количество выбросов от стационарных источников в республике приходится на долю предприятий химической и нефтехимической промышленности – концерна «Белнефтехим» – 23% и «Белэнерго» – 22,6 %, Министерства архитектуры и строительства – 11% (1998 г).

При работе пылеугольных и мазутных ТЭС в атмосферу выбрасывается пыль различного состава. Считается, что антропогенные загрязнения воздуха пылью не превышают 5%. Однако по своему составу пыль достаточно опасна для человека, вызывая легочные и аллергические заболевания.

В общем объеме атмосферы пыль составляет ничтожно малую долю. В то же время основная часть загрязнения пылью сконцентрирована над городами, с суммарной площадью не более 2% суши. Частицы пыли разносятся на большие расстояния. Загрязнение пылью населенных пунктов крайне неравномерное с преобладанием этого показателя для городской местности.

Для энергетики РБ проблема пылеулавливания на ТЭС не является первоочередной из-за преобладания природного газа в качестве топлива. Для пылеугольных

---

<sup>6</sup> Возгонка (сублимация) — переход вещества из твердого состояния сразу в газообразное, минуя жидкое. Поскольку при возгонке изменяется удельный объем вещества и поглощается энергия (теплота сублимации), возгонка является фазовым переходом первого рода. Обратным процессом является десублимация. Известным примером десублимации является появление инея на ветках во время усиления мороза.

ТЭС эта проблема относится к числу актуальных, требующих постоянного внимания.

**Бензапирен.** (4-е ароматических кольца соединены между собой и все, больше ничего). Относится к чрезвычайно опасным загрязняющим веществам и образуется при неполном сгорании углеводородных топлив или других различных органических веществ ( бензапирен содержится в табачном дыме). Бензапирен – один из сильнейших канцерогенов.

Загрязнение атмосферы бензапиреном резко возросло в связи с развитием автомобильного транспорта и интенсивным потреблением горючих ископаемых (так, ГРЕС мощностью 2 млн. кВт ежедневно сжигает 17800 т угля и 2500 т. мазута). В США ежегодно выпускается в атмосферу до 1300 т. бензапирена. А чтобы вызвать рак легких и кожи человека, достаточно нескольких миллиграммов этого вещества.

## **1.12 МЕРОПРИЯТИЯ ПО ОГРАНИЧЕНИЮ ВЫБРОСОВ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ В АТМОСФЕРУ**

Ограничения выбросов вредных веществ в атмосферу осуществляются с помощью технических мероприятий. К ним относятся:

1. переход на нетрадиционную энергетику;
2. замена сырья теми его видами, при сгорании которых образуется меньшее количество вредных веществ;
3. предварительная обработка топлива (десульфуризация, газификация);
4. изменение технологии производства:
  - а) изменение конструкции пылеугольной горелки, которая формирует факел и определяет процессы горения в факеле;
  - б) применение различных схем ступенчатого сжигания (по вертикали, горизонтали, трехступенчатое и т.п.);
  - в) создание замкнутых производственных циклов;
5. отделение твердых частиц, а также удаление и обезвреживание вредных газообразных веществ;
6. повышение степени распределения вредных веществ на большую площадь путем применения более высоких дымовых труб.

## **1.13 ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЫЛЕЙ**

Для выбора аппаратов с целью эффективной очистки газа необходимо знать следующие основные свойства промышленной пыли<sup>7</sup>:

### **1. Дисперсность или размер частиц**

Размер частиц пыли является одной из основных характеристик определяющих выбор типа аппарата или системы аппаратов для очистки газа. Крупная пыль лучше чем мелкая оседает из газового потока и может быть уловлена в аппарате простей-

---

<sup>7</sup> В технической литературе термины грубый аэрозоль и пыль являются синонимами.

шего типа. Для очистки газа от мелкой пыли зачастую требуется не один а несколько аппаратов установленных последовательно по ходу газа.

Одной из классификаций пыли по размерам служит ее разделение на:

- 1) Крупную (крупнодисперсную) пыль (размером  $> 10$  мкм);
- 2) Мелкую (мелкодисперсную) пыль (размером  $< 10$  мкм);
- 3) Возгоны (размером  $< 1$  мкм).

Если в газах содержится пыль различных размеров то ее условно разделяют на фракции и указывают процентное содержание каждой из них т.е. *фракционный состав*. Так, например, пыль содержащую частицы размером до 100 мкм, можно разделить на следующие фракции (табл.7):

Таблица 7. Фракционный состав пыли

Номер фракции	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Размер частиц, мкм	0-5	5-10	10-15	15-20	20-30	30-40	40-60	60-90	90-100

## 2. Форма

Пыль состоит из частиц самой разнообразной формы. Но обычно при расчетах пылеуловителей для простоты принимают сферическую форму.

## 3. Химический состав пыли

Он всегда характерен для данного производства или технологического процесса. Например:

- пыль, образующаяся во время плавки металлов, состоит из оксидов этих металлов флюсов<sup>8</sup> и добавок;
- пыль в производстве строительных материалов состоит из их минеральных составляющих;
- текстильная пыль образуется из мельчайших частиц перерабатываемых волокон и т.п.

По химическому составу пыли судят о ее токсичности. Зная химический состав пыли, можно обоснованно выбрать мокрый или сухой способ очистки газа. Так:

– если пыль содержит компоненты, способные образовывать с водой или другой жидкостью, подаваемой на орошение аппаратов, соединения, которые при оседании на стенках аппаратов и газоходов трудно удалять, применять мокрый способ очистки газов нельзя.

– при наличии в руде серы во время металлургических процессов в газ переходят ее оксиды, которые при мокром способе очистки образуют кислоты. В этом случае следует принимать меры по защите аппаратов и газоходов от коррозии и обеспечивать нейтрализацию шламовых вод. Поэтому для очистки таких газов целесо-

---

<sup>8</sup> **Флюсы** – материалы, применяемые в металлургических процессах с целью образования или регулирования состава шлака (например, для понижения тугоплавкости и вязкости, изменения электропроводности), или для предохранения расплавленных металлов от взаимодействия с внешней газовой средой.

В качестве флюсов применяют известняк, доломит, пиритный огарок, известь, соду, кварц, песок, глину, бой кирпича и т.п.

образнее применять сухой способ.

– при наличии в составе пыли оксидов кремния и аналогичных им соединений применяют меры по защите аппаратов и газоходов от механического истирания.

#### **4. Воспламеняемость и взрывоопасность**

Чем меньше размеры частиц тем больше их удельная поверхность и выше физическая и химическая активность пыли.

Высокая химическая активность некоторых видов пыли является причиной ее взаимодействия с кислородом воздуха. Окисление частиц пыли сопровождается повышением температуры. Поэтому в местах скопления пыли возможны ее самовоспламенение и взрыв. Поэтому при проектировании пылеуловителей для улавливания такого рода пылей необходимо предусмотреть установку взрывных клапанов.

По степени пожаро- и взрывоопасности пыли делятся на две группы и четыре класса. К *группе А* относятся взрывоопасные пыли с нижним концентрационным пределом взрываемости<sup>9</sup> до 65 г/м<sup>3</sup>. Из них пыль с нижним пределом взрываемости до 15 г/м<sup>3</sup> относится к *I классу*, а остальные – ко *II классу*.

В *группу Б* входят пыли имеющие нижний концентрационный предел выше 65 г/м<sup>3</sup>. Из них пыли, температура воспламенения которых до 250°C, относятся к *III классу*, а пыли, воспламеняющиеся при температуре выше 250°C, – к *IV классу*.

Взрывоопасность пыли различных видов топлива зависит от содержания летучих, влажности, зольности, тонкости помола, концентрации пыли в воздухе, температуры воздуха и пыли.

Угли с содержанием летучих компонентов менее 10% невзрывоопасны. Пыль угля с выходом летучих более 30% взрывоопасна при 65–70°C. Наиболее опасны концентрации угольной пыли в пределах от 300 до 600 г/м<sup>3</sup>.

**5. Смачиваемость пыли** – способность частиц адсорбировать влагу на своей поверхности. Более крупные частицы смачиваются лучше.

Смачиванию препятствует газовая оболочка, образующаяся вокруг мелких частиц пыли. Чем крупнее частицы пыли и чем округлее их форма, тем слабее силы, удерживающие газовую оболочку вокруг поверхности частиц, и, следовательно, тем больше их способность смачиваться. Смоченные частицы лучше отделяются от газа в аппаратах газоочистки.

Смачиваемость определяется путем измерения доли смоченного и погружившегося на дно сосуда порошка насыпанного тонким слоем на поверхность воды.

Пыли по смачиваемости разделяют на три группы:

1. Гидрофобная (плохо смачиваемая, менее 30%);
2. Умеренно смачиваемая (30–80 %);
3. Гидрофильная (хорошо смачиваемая, 80–100%).

В зависимости от химического состава некоторые пыли при смачивании водой схватываются (цементируются, затвердевают). Такие пыли при оседании на стенки аппаратов и газоходов образуют трудно удаляемые отложения.

---

<sup>9</sup> Верхние пределы взрываемости пыли весьма велики и большей частью встречаются редко, поэтому они не представляют интереса. Например верхний предел взрываемости торфяной пыли составляет 2,2, пыли бурого угля 4,2, пыли сахара 13,5 кг/м<sup>3</sup> и т.д.

## **6. Плотность пыли**

Различают *истинную плотность* пыли и *плотность насыпной массы*.

Истинная плотность пыли обусловлена химическим составом материала, из которого она образована, и измеряется отношением массы пыли к занимаемому ею объему.

В процессе очистки уловленная пыль собирается в определенную емкость (бункер пылеуловителя) и образует насыпную массу. Плотность насыпной массы из-за наличия воздушных пустот между частицами несколько меньше. Этой величиной обычно пользуются для определения объема, который занимает пыль в бункерах (чтобы определить необходимый размер бункера).

В зависимости от размеров частиц насыпная плотность может быть меньше истинной в 2-3 раза для крупной пыли и более чем на порядок для мелкой. Плотность пыли играет большую роль при очистке газа. Чем больше плотность пыли, тем выше степень очистки.

## **7. Абразивность пыли**

Абразивность – способность пыли вызывать истирание стенок конструкций и аппаратов, с которыми соприкасается пылегазовый поток. Она зависит от:

- твердости и плотности материала, из которого образовалась пыль;
- размера частиц пыли, их формы;
- скорости потока.

При значительной абразивности пыли воздуховоды, газоходы, стенки пылеулавливающих аппаратов выходят из строя в весьма короткий срок. Поэтому в ряде случаев применяют специальные облицовочные защитные материалы.

**8. Угол естественного откоса** – угол, который занимает пыль в свеженасыпанном состоянии. По углу естественного откоса пыли делают уголь наклона бункеров пылеуловителей.

**9. Коагуляция (укрупнение) пыли** заключается в способности ее мелких частиц слипаться между собой (под действием молекулярных сил) и образовывать крупные частицы.

Частицы размером более 100 мкм практически не коагулируют.

**10. Удельное электрическое сопротивление (УЭС)** представляет собой омическое сопротивление образца пыли в форме куба с гранями 1 м прохождению электрического тока (Ом·м).

Величина УЭС слоя пыли на электродах электрофилтра является одним из важных факторов, влияющих на эффективность работы сухих электрофильтров.

Существует критическое значение УЭС пыли при которой КПД аппарата резко снижается. Это происходит вследствие появления обратной короны или за счет большого падения напряжения на слое высокоомной пыли, находящейся на осадительном электроде (рис.4).

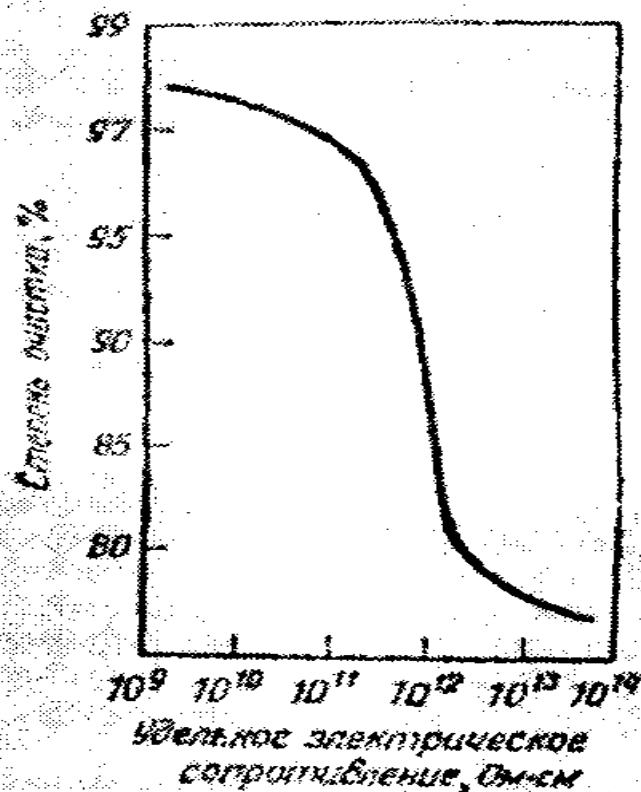


Рисунок 4 – Зависимость степени очистки электрофильтра от величины удельного электрического сопротивления пыли

Все пыли по УЭС разделяют на *три* группы:

*I. группа.* Частицы пыли, имеющие УЭС меньше  $10^4$  Ом·м.

Они легко разряжаются и, приобретая одноименный с осадительными электродами заряд отрываются от поверхности и попадают в газовый поток, способствуя увеличению вторичного уноса. Примером такой пыли могут служить частицы недогоревшего топлива (недожог) в дымовых газах котельных агрегатов, плохо улавливаемые в электрофильтрах<sup>10</sup>.

*II. группа.* Частицы пыли с удельным сопротивлением  $10^4$ – $10^{10}$  Ом·м.

Они удовлетворительно улавливаются в электрофильтрах. При осаждении на электроде эти пыли разряжаются не сразу, а через некоторое время, достаточное для накопления слоя и формирования из мелких осажденных частиц агломератов под действием электрических сил. Размер агломератов обычно таков, что основная часть пыли при встряхивании электродов попадает в бункер электрофильтра и только небольшое количество уносится газовым потоком, образуя вторичный унос. К таким пылям можно отнести цементную пыль (при производстве цемента мокрым способом).

*III. группа.* Частицы пыли с удельным сопротивлением выше  $10^{10}$  Ом·м.

Они создают наибольшие трудности в протекании процесса электрической фильтрации, так как вызывают появление обратной короны.

<sup>10</sup> Такие пыли предпочтительнее улавливать в рукавных фильтрах.

## 1.14 ФИЗИОЛОГИЧЕСКОЕ ВЛИЯНИЕ ПЫЛИ НА ЧЕЛОВЕЧЕСКИЙ ОРГАНИЗМ

Главную опасность для человека представляет пребывание в сильно запыленной среде, при котором значительное количество пыли попадает в организм. При этом создаются условия для длительного контакта относительно большой массы пыли со слизистой поверхностью дыхательных путей, которая наиболее восприимчива к ее действию.

Большое значение имеет размер пылинок, так как, чем мельче частицы тем глубже они проникают в дыхательную систему, проходя в легкие и оседая там на длительный срок, вызывая поражение легочной ткани.

Пылинки могут проникнуть в поры потовых и сальных желез, закупоривая их и затрудняя функции этих желез. Попавшие с пылью микробы в закупоренных протоках сальных желез могут развиваться, вызывая гнойничковые заболевания кожи – пиодермию. Закупорка потовых желез пылью в условиях горячего цеха вызывает уменьшение потоотделения, что затрудняет терморегуляцию.

Пыль, попавшая в глаза, вызывает воспалительный процесс слизистых оболочек – конъюнктивит. Действие пыли вызывает раздражение верхних дыхательных путей и воспаление их.

Нетоксичные пыли, находясь в легких длительное время, постепенно вызывают разрастание вокруг каждой пылинки соединительной ткани, которая не способна воспринимать кислород из вдыхаемого воздуха. Это процесс разрастания соединительной ткани протекает медленно, как правило, годами. При длительной работе в условиях высокой запыленности, разрастаясь соединительная ткань постепенно замещает легочную, снижая таким образом основную функцию легких – усвоение кислорода и выделение углекислоты.

## 1.15 ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ПЫЛЕУЛОВИТЕЛЕЙ

Работа любого пылеуловителя основана на использовании одного или нескольких механизмов осаждения взвешенных в газах частиц.

1. *Гравитационное осаждение (седиментация)* происходит под действием силы тяжести при прохождении частиц через газоочистной аппарат.
2. *Осаждение под действием центробежной силы* происходит при криволинейном движении (вращении) аэродисперсного потока.
3. *Инерционное осаждение* происходит в том случае, когда масса частицы или скорость ее движения настолько значительны, что она не может следовать вместе с газом по линии тока, огибая препятствие, а, стремясь по инерции продолжить свое движение, сталкивается с препятствием и осаждается на нем.
4. *Электрическое осаждение* действует, когда происходит заряд частиц, содержащихся в газах, а затем под действием электрического поля они осаждаются на электродах. Электрическое осаждение возможно и при взаимодействии твердых частиц с каплями жидкости, причем электрический заряд может быть подведен либо к орошающей жидкости, либо одновременно и



к частицам, и к жидкости.

Помимо указанных выше основных механизмов осаждения можно перечислить и ряд других: *термофорез, диффузиофорез, фотофорез, воздействие магнитного поля* и др. Влияние того или иного механизма на осаждение частиц определяется целым рядом факторов, и в первую очередь их размером.

В технике пылеулавливания применяется большое число аппаратов, отличающихся друг от друга как по конструкции, так и по принципу осаждения взвешенных частиц. По способу улавливания пыли их обычно подразделяют на аппараты сухой, мокрой и электрической очистки газов.

В основе работы сухих пылеуловителей лежат гравитационные, инерционные и центробежные механизмы осаждения. Самостоятельную группу аппаратов сухой очистки составляют пылеуловители фильтрационного действия. В основе работы мокрых пылеуловителей лежит контакт запыленных газов с промывной жидкостью. В электрофильтрах осаждение частиц пыли происходит за счет сообщения им электрического заряда.

Приведенная на рис.5. классификация пылеуловителей не претендует на абсолютность, так как существует значительное число аппаратов, работа которых основана на совмещении различных принципов осаждения. Так, например, волокнистый фильтр при улавливании туманов может быть отнесен к категории мокрых пылеуловителей. То же самое можно сказать и о мокром электрофильтре. Поэтому данную классификацию следует рассматривать как условную, позволяющую тем не менее достаточно наглядно охватить абсолютное большинство существующих пылеуловителей.

Сухие пылеуловители делятся на *гравитационные, инерционные, фильтрующие (фильтрационные) и электрические*. По некоторым особенностям их действия или основному конструктивному признаку группы пылеуловителей делятся на подгруппы, а в зависимости от специфики конструктивного оформления на типы аппаратов.

*Гравитационные пылеуловители* – пылеосадительные камеры, в которых выпадение частиц из газового потока происходит под действием силы тяжести.

В *инерционных пылеуловителях* выделение частиц из газового потока происходит под действием сил инерции, возникающих вследствие изменения направления или скорости движения газа. Они делятся на три подгруппы: *жалюзийные* (пластинчатые или конические); *циклонные* (возвратнопоточные, прямоточные и вихревые); *ротационные*.

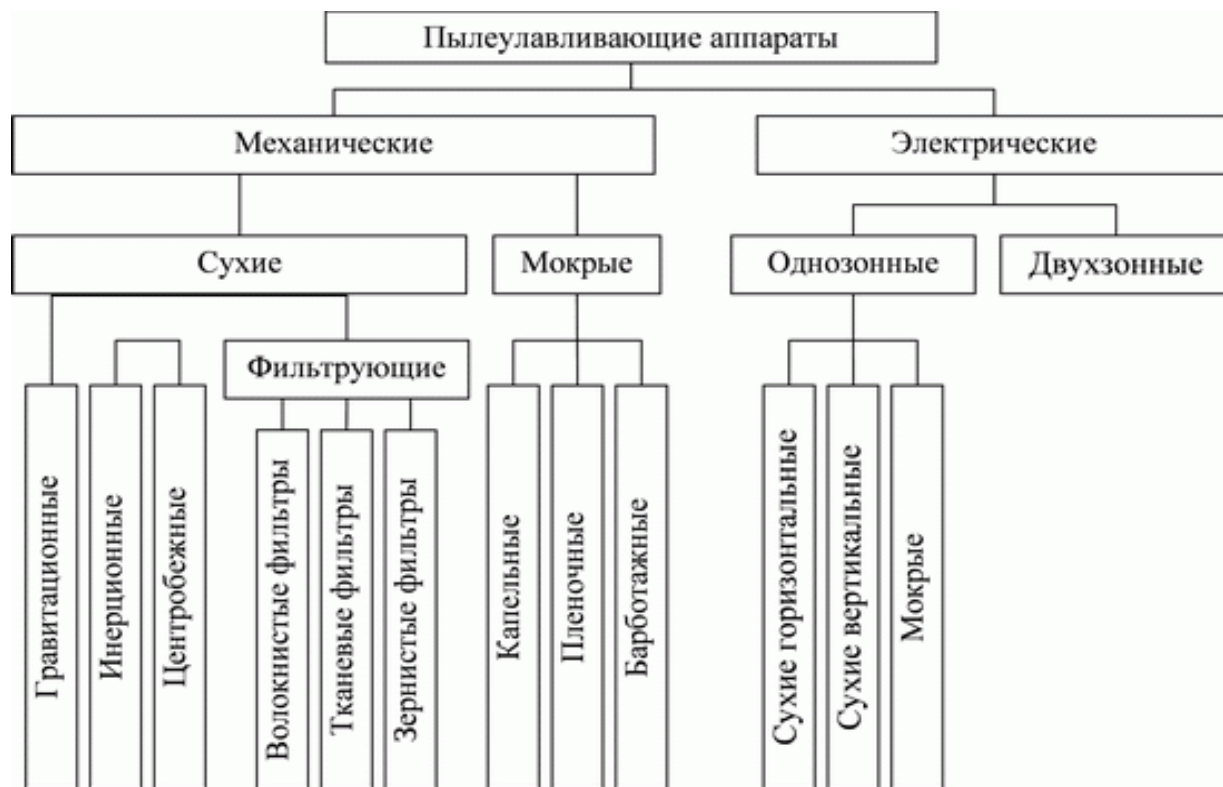


Рисунок 5 – Схема классификации пылеуловителей

*Электрофильтры* действуют на основе сообщения частицам в поле коронного разряда электрического заряда с последующим их осаждением на осадительных электродах. Электрофильтры делятся на две подгруппы: *однозонные* и *двухзонные* с осадительными электродами *пластинчатыми* и *трубчатыми*, *подвижными* и *неподвижными*.

*Фильтрующие пылеуловители* — это устройства, в которых выделение частиц пыли из газового потока происходит вследствие его прохода через слой пористого материала. Эта группа состоит из следующих подгрупп: *тканевые фильтры* (каркасные и рукавные), *волокнистые* (рукавные, панельные, ячейковые), *зернистые* (насыпные, жесткие), *сетчатые* (ячейковые, барабанные).

## 1.16 ГАЗООЧИСТКА НА АЭС

Эксплуатация АЭС всегда сопровождается образованием радиоактивных газов и аэрозолей, выброс которых в атмосферу производится только после определенной выдержки, очистки и разбавления воздухом до безопасных концентраций.

Радиоактивные газы образуются при делении ядер урана, воздействии нейтронов на воздух, вентилирующий шахту реактора, парообразовании в местах протечек теплоносителя. Аэрозоли возникают при смешении радиоактивной пыли с воздухом, например при ремонтных работах в реакторном помещении, дезактивации оборудования, разделке твэлов в горячей камере и т. д.

Для улавливания аэрозолей применяются тканевые фильтры из специальной тонковолокнистой ткани типа ФПП (ткань Петрянова), снижающие содержание аэрозолей в воздухе в 100–1000 раз. Фильтры устанавливаются в вентиляционных

вытяжных системах. Применяются они и в качестве индивидуального средства защиты (фильтры-лепестки).

Для улавливания легколетучих радиоактивных веществ применяются фильтры с активированным углем. Вещества накапливаются в компенсаторах объема, корпусе и шахте реактора, бассейне выдержки ТВЭЛов и другом оборудовании. Удаляемые в вентиляционные системы газы «сдувки» пропускаются через фильтры и выбрасываются через вентиляционную трубу в атмосферу. При повышенной радиоактивности газов после фильтров они перед выбросом закачиваются компрессорами в емкости выдержки (газгольдеры) и выдерживаются несколько суток для снижения активности. Затем газы разбавляются воздухом и выбрасываются в вентиляционную трубу. Время выдержки и разбавления рассчитывают таким образом, чтобы среднегодовая концентрация активности атмосферы в районе АЭС не превышала ПДК отдельных изотопов.

### **1.17 СНИЖЕНИЕ ВЫБРОСОВ ДИОКСИДА СЕРЫ SO<sub>2</sub>. УДАЛЕНИЕ СЕРЫ ИЗ ТОПЛИВА ДО ЕГО СЖИГАНИЯ**

Принципиально существуют два подхода к решению проблемы снижения выбросов соединений серы при сжигании органических топлив:

- 1) Удаление серы из топлива до его сжигания;
- 2) Очистка от соединений серы продуктов сгорания топлив (сероочистка дымовых газов);
- 3) Использование новых технологий сжигания.

#### **Сероочистка жидких топлив.**

В жидком топливе (мазутах) сера находится в составе сероорганических соединений (меркаптаны, сульфиды и прочие), а также в виде сероводорода и элементарной серы. Все эти вещества хорошо растворимы в углеводородах).

В настоящее время применяются два метода очистки жидкого топлива от серы – *прямой* и *косвенный*.

При *прямой* сероочистке жидкое топливо обрабатывается путем каталитического гидрирования с выделением серы в виде сероводорода и с дальнейшим восстановлением его до элементарной серы. Стоимость обработки зависит от многих факторов (вида нефти, глубины сероочистки, мощности установки и др.) и в среднем на уровне 1975 г в США составляла 7 дол. за тонну (при глубине сероочистки с 4–3% до 1–0,6%). Такого типа установки мощностью по 6–10 Мт/год эксплуатируются в Японии, США, Мексике, Венесуэле и в ряде других стран.

Метод *косвенной* сероочистки заключается в перегонке топлива под вакуумом. Глубина сероочистки доходит до 0,3–0,5%. Такие установки мощностью до 18 Мт/год эксплуатируются в ряде стран района Карибского моря и Японии. Стоимость сероочистки на уровне цен 1975 г. оценивалась в 7,5–9,0 дол. за тонну.

**Сероочистка твердых топлив.** В угле сера также содержится в двух формах: *неорганической* и *органической*.

*Неорганическая сера* присутствует в виде пиритов, т.е. сульфидов металлов, в частности сульфида железа FeS<sub>2</sub>, называемым также железным колчеданом.

*Органическая сера* химически связана с углеродом природного угля.

Для удаления неорганической серы достаточно специальной промывки угля, проводимой в несколько этапов.

Для удаления органической серы требуется химическая обработка.

Сера в виде пиритов может составлять от 30 до 70% общего содержания серы в угле, но обычно органическая и неорганическая сера присутствуют в равных количествах.

Для очистки угля от неорганической серы его предварительно дробят, затем раздробленный уголь смешивают с водой в большом резервуаре. Пирит имеет бóльшую плотность, чем уголь, и потому оседает на дно быстрее; очищенный уголь собирают в верхней части резервуара. Таким способом можно обработать за 1 ч 500– 1000 т угля. Промывка – один из наиболее эффективных способов освобождения добытого угля от большей части содержащихся в нем пиритов.

*Химическая очистка угля* – это общее название достаточно разнообразных процессов, направленных на удаление органической серы. Специалистами предложено уже несколько десятков процессов.

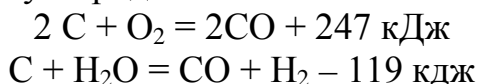
Один из перспективных методов разработан Бательским мемориальным институтом. Предложенный институтом метод предполагает обработку мелко раздробленного угля, добытого из шахты, водой, содержащей гидроксиды натрия и кальция. После такой обработки при высоком давлении и температуре уголь очищается от большей части пиритов и половины органической серы; эти примеси остаются в растворе. Затем уголь промывают и высушивают, после чего он готов к употреблению. Такой уголь можно сжигать в топках, затем улавливать двуокись серы из выходящих в дымоход газов, но чтобы использовать его в крупных масштабах, следует удешевить этот метод.

Есть еще один процесс, посредством которого можно, по-видимому, удалять до 60% органической серы, и называется он **очищением угля в растворе**. Добытый из шахты уголь смешивается с органическим растворителем антраценом при  $T = 450^{\circ}\text{C}$  и  $P = 1,4 \text{ МПа}$  в присутствии водорода. В результате органическая сера переходит в  $\text{H}_2\text{S}$  и удаляется. После этого чистый уголь можно получить либо в твердом виде, либо в виде жидкости. Твердая фаза имеет зольность менее 1%, хотя зольность необработанного угля варьирует в пределах от 8 до 20%. Содержание серы уменьшается до менее 1%, а теплотворная способность возрастает на 30%. Очищающий уголь растворитель регенерируется и возвращается обратно в рабочий процесс. Существенное уменьшение содержания серы и снижение зольности практически до нуля делает возможным исключить не только улавливание вредных примесей из т = осаждение взвешенных частиц.

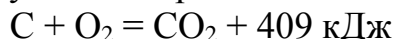
**Газификация топлив.** Одним из способов очистки топлива от сернистых соединений является его газификация с одновременным удалением серы и ее соединений.

Понятие «газификация топлив» включает в себя ряд процессов перевода твердого и жидкого топлива в газообразное состояние путем неполного окисления при высокой температуре с одновременным удалением вредных примесей. Несмотря на большое разнообразие методов газификации, все они характеризуются одними и теми же химическими реакциями.

При газификации твердого топлива окислению кислородом или водяным паром подвергается непосредственно углерод:



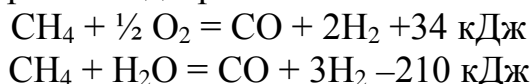
При этом часть углерода не удается перевести в СО и он сгорает полностью:



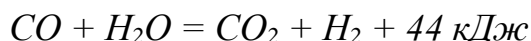
Образовавшийся углекислый газ реагирует с раскаленным углеродом:



В процессах газификации жидких топлив под действием высокой температуры происходит расщепление углеводородов до низкомолекулярных соединений или элементарных веществ, которые и подвергаются окислению:



Образующиеся при газификации газообразные продукты реагируют между собой:



*Рассмотрим несколько методов газификации топлив для энергетических целей.*

## **1.18 ОЧИСТКА ОТ СОЕДИНЕНИЙ СЕРЫ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ ТОПЛИВ (СЕРООЧИСТКА ДЫМОВЫХ ГАЗОВ)**

Всего за последние годы в разных странах предложено более 400 различных методов очистки дымовых газов от серы, основанных на различных химических и физических принципах:

1. Химическом связывании с образованием регенерируемых и нерегенерируемых отходов;
2. Конверсии (превращении) диоксида серы в триоксид в газовой фазе с помощью катализаторов или специальных электрических разрядов;
3. Сорбции твердыми веществами (активированным углем, цеолитами, смолами) с последующей регенерацией сорбентов;
4. Сорбции жидкими веществами – специальными органическими жидкостями (адипиновая кислота);
5. Жидкофазном каталитическом восстановлении диоксида серы до элементарной серы.

В производстве освоено около 20 промышленных технологий по удалению SO<sub>2</sub> с приемлемыми технико-экономическими показателями.

Основное место в мировой практике сероочистки дымовых газов занимают технологии с использованием *кальцита (известняка) – CaCO<sub>3</sub> и извести – Ca(OH)<sub>2</sub>*:

- мокрая известняковая;
- мокрая известковая;
- мокро-сухая известковая;
- сухая известковая.

## 1.19 МОКРАЯ ИЗВЕСТНЯКОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ СЕРООЧИСТКИ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ

**Мокрая известняковая технология** основана на связывании диоксида серы известняковой суспензией с образованием сульфита кальция, который доокисляют до двухводного сульфата (гипса). Основными химическими реакциями мокрой известняковой технологии являются:

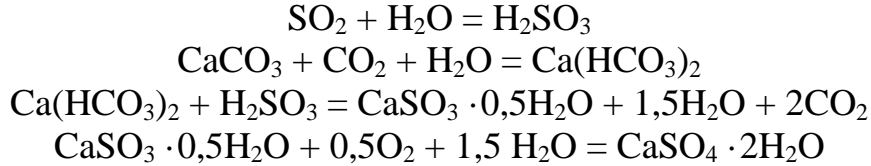
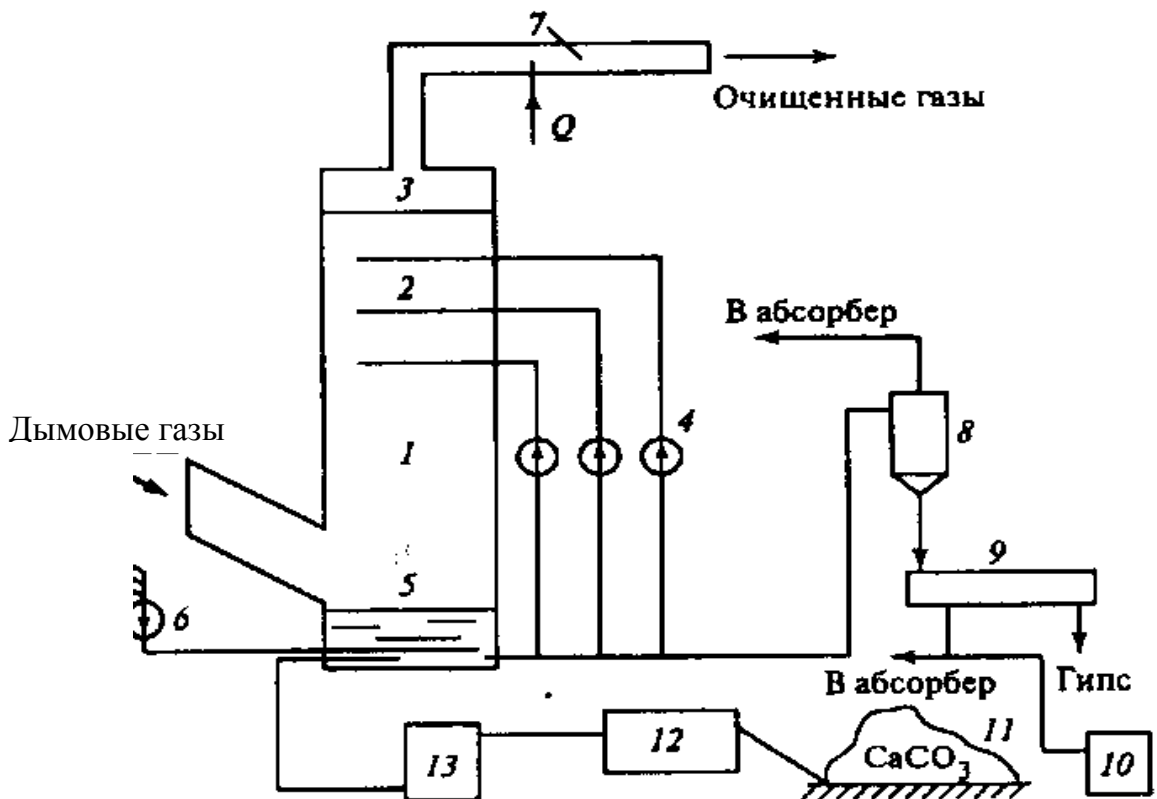


Схема мокрой известняковой установки сероочистки показана на рис. 6.



1 – абсорбер; 2 - ярусы орошения; 3- брызгоуловитель; 4 - насосы циркуляции известковой суспензии; 5 - сборно-окислительная емкость; 6 – узел принудительного окисления сульфита кальция; 7 – нагреватель очищенных газов; 8 - система гидроциклонов; 9 - узел обезвоживания гипса; 10 – узел нейтрализации и очистки сточных вод; 11 - склад известняка; 12 – система дробления и размола известняка; 13 – узел приготовления известковой суспензии.

Рисунок 6 – Схема мокрой известняковой технологии сероочистки

Установка работает следующим образом. Обеспыленные дымовые газы поступают в нижнюю часть абсорбера над поверхностью известковой суспензии ( $\text{CaCO}_3$  и  $\text{H}_2\text{O}$ ) в сборно-окислительной емкости. Сверху в противоток дымовым газам также подается известковая суспензия. Известковая суспензия в сборно-окислительной емкости дополнительно насыщается  $\text{CO}_2$ . Очищенные газы пропускают через брызгоуловитель, для выделения из них капельной влаги, после чего нагревают на

20–25°C и выбрасывают в атмосферу. Суспензия из абсорбера попадает в сборно-окислительную емкость, куда вводят воздух для принудительного окисления сульфита кальция в сульфат (гипс).

Гипсовую суспензию пропускают через одну-две ступени гидроциклонов, где от нее отделяют мелкие частицы гипса и непрореагировавшие частицы известняка, которые вместе с жидкостью возвращаются в абсорбер. Эти частицы имеют большую поверхность, что делает их предпочтительными центрами кристаллизации растворенного сульфата кальция, благодаря этому дополнительно снижается вероятность образования отложений на внутреннем оборудовании абсорбера. Обогащенную крупными кристаллами гипса суспензию обезвоживают в вакуумных фильтрах ленточного или барабанного типа. Фильтрат также возвращают в установку, либо его нейтрализуют (сточные воды), после чего сбрасывают в природные водоемы.

Удельная стоимость улавливания 1 т SO<sub>2</sub> составляет 260–1000<sup>11</sup> и более долл/т в зависимости от установленной мощности.

Следует отметить, что мокрая известковая технология получила наибольшее распространение в мировой практике сероочистки, она имеет следующие преимущества:

1. Позволяет обеспечить высокую степень улавливания диоксида серы (95%).
2. Является единственной экологически безопасной, поскольку и реагент, и отходы нейтральны и плохо растворимы, так что никакие нарушения процесса или аварии не приведут к загрязнению окружающей среды или нанесению вреда здоровью населения.

## 1.20 МОКРАЯ ИЗВЕСТКОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ СЕРООЧИСТКИ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ

**Мокрая известковая технология** основана на связывании SO<sub>2</sub> водной суспензией известия с образованием сульфита кальция и последующим его окислением до двухводного сульфата (гипса). Основными химическими реакциями мокрой известковой технологии являются:

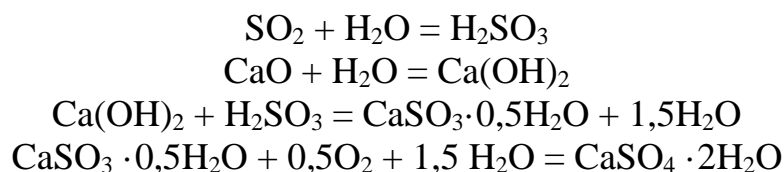


Схема мокрой известковой очистки как две капли воды схожа с предыдущей (известняковой) установкой, только вместо известняковой суспензии в ней используют уже суспензию известковую.

Установка работает также как и мокрая известняковая. Гидроксид кальция имеет более высокую растворимость в воде, чем известняк, и более активен, поэтому объем абсорбера примерно вдвое меньше аппарата для мокрой известковой технологии.

Удельная стоимость улавливания 1 т SO<sub>2</sub> по данной схеме несколько ниже (на 15–20%), чем по мокрой известняковой. Степень улавливания SO<sub>2</sub> составляет 96%.

<sup>11</sup> 260 долл/т при установленной мощности котла 80 МВт.

Мокрая известковая сероочистка занимает второе место в мировой практике по распространению на тепловых электростанциях вследствие меньших размеров и стоимости оборудования и более низких эксплуатационных расходов по сравнению с мокрой известняковой технологией. Но работа с известью требует соблюдения определенных правил безопасности для исключения ее воздействия на окружающую среду и здоровье населения.

## 1.21 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СКРУББЕРОВ ВЕНТУРИ В СЕРООЧИСТКЕ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ

**Использование скрубберов Вентури** для улавливания диоксида серы основано на промывке дымовых газов раствором соды с последующей конверсией продукта реакции в сульфат кальция. Основными химическими реакциями технологии со скрубберами Вентури (ТСВ) являются:

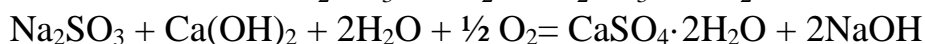
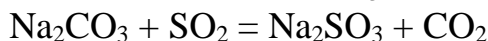
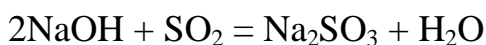
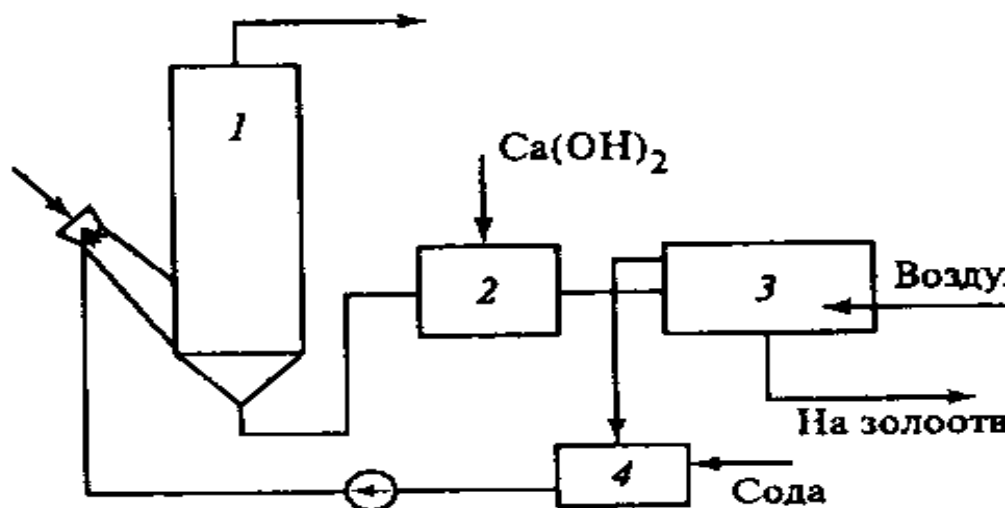


Схема установки сероочистки показана на рис. 7.



1 – скруббер Вентури; 2 – конвертер; 3 – разделитель твердой и жидкой фазы; 4 – емкость жидкого реагента.

Рисунок 7 – Схема сероочистки с использованием скрубберов Вентури

Достигаемая степень сероочистки по данной схеме всего 50%. Удельная стоимость улавливания 1 т  $\text{SO}_2$  составляет 240-740 долл./т (при установленной мощности котла 80–200 МВт).



## 1.22 СНИЖЕНИЕ ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ СОЕДИНЕНИЙ СЕРЫ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ СЖИГАНИЯ

**Сжигание угля в кипящем слое** – это новая технология удаления двуокиси серы, пока проходящая стадию испытания. При новом способе уголь по-прежнему сжигается в топках котлов, однако предварительно он смешивается с гранулированным известняком и насыпается слоями на металлические поддоны. Воздух для поддержания процесса горения подается снизу, через отверстия в поддонах, и происходит через слои угля. Поток подаваемого воздуха настолько силен, что кусочки угля и известняка поднимаются над поддоном, как бы всплывая, подобно пене на поверхности кипящей воды (отсюда и название «кипящий слой»).

Известняк реагирует с двуокисью серы, образующейся при горении угля; в результате образуются мельчайшие частицы сульфата кальция, которые перехватываются потоком отходящих газов и удаляются вместе с летучей золой, обычно в электростатических пылевых камерах. Температура горящего угля в кипящем слое ниже, чем температура горящего угля в обычной топке; поэтому при сгорании в кипящем слое образуется меньше окислов азота. В итоге сжигание в кипящем слое уменьшает содержание и окислов серы, и окислов азота по сравнению с обычной топкой.

## 1.23 ОБРАЗОВАНИЕ ОКСИДОВ АЗОТА ПРИ ГОРЕНИИ ОРГАНИЧЕСКИХ ТОПЛИВ

Оксиды азота, в дальнейшем условно в совокупности обозначаемые, как  $\text{NO}_x$ , определяют на 40–60% токсичность продуктов сгорания угля и мазута и на 95–98% – природного газа.

Напомним, что в дымовых газах оксиды азота преимущественно представлены его монооксидом ( $\text{NO}$  составляет 95–99 % общего выброса  $\text{NO}_x$ ). Однако после выброса дымовых газов в атмосферу под воздействием кислорода воздуха большая часть  $\text{NO}$  превращается в  $\text{NO}_2$ .

Источником оксидов азота может быть молекулярный азот воздуха, используемого в качестве окислителя при горении, или азотсодержащие компоненты топлива. Таким образом, можно выделить три источника в образовании оксидов азота:

- «топливные»  $\text{NO}_x$ ;
- «термические»  $\text{NO}_x$ ;
- «быстрые»  $\text{NO}_x$ .

**«Топливные»  $\text{NO}_x$ .** Этим термином обозначают оксиды азота, образующиеся из азотсодержащих компонентов *жидких и твердых топлив* (природный газ за редким исключением не содержит связанного азота) при температурах 700–1100°C на начальном (корневом) участке факела.

Содержание азота в большинстве мазутов составляет 0,25–0,35 % мас. Содержание азота в твердых видах топлива в зависимости от вида угля составляет от 0,7 до 2,0%. В большинстве проведенных исследований была обнаружена прямопропорциональная зависимость концентрации образующихся оксидов азота от содержания азота в исходном топливе. Кроме того, степень перехода азотсодержащих со-

единений топлива в оксиды азота быстро нарастает с увеличением коэффициента избытка воздуха, подаваемого на горение.

«Термические»  $\text{NO}_x$ . Эти оксиды образуются за счет окисления молекулярного азота кислородом воздуха. Их образование идет при высокой (максимальной) температуре ( $T = 1800\text{--}1900\text{ K}$ ), т.е в зоне факела, где уже сгорела основная масса топлива, и при условии высокой концентрации кислорода.

В так называемых «низкотемпературных» топочных устройствах, в которых максимальная температура не превышает  $1500\text{ K}$ , термические  $\text{NO}_x$  вообще не учитывают ввиду их малости. Такое положение характерно для пылеугольных топок с прямым сжиганием высоковлажных бурых углей или при высокой доле рециркуляции газов, подаваемых через горелки.

«Быстрые» оксиды азота. Данный вид оксидов азота образуется в зоне достаточно низких температур (в корневой части факела; там же идет образование и топливных оксидов азота) в результате реакции углеводородных радикалов с молекулой азота (радикалы  $\text{CH}$ , выступающие в горении в качестве промежуточного компонента, реагируют с азотом и образуют цианисто-водородную кислоту  $\text{HCN}$ , которая затем сложным образом реагирует с образованием  $\text{NO}$ ). Этот путь образования оксидов азота протекает с очень высокой скоростью (отсюда их название – «быстрые»).

Образование «быстрых» оксидов азота прежде всего зависит от концентрации радикалов в корневой части факела. Следовательно, существенное количество быстрых  $\text{NO}_x$  образуется только при сжигании газа и коэффициенте избытка воздуха несколько меньше 1,0.

Вклад различных видов оксидов азота в общую картину эмиссии  $\text{NO}_x$  показан на примере сжигания пыли каменного угля (рис. 8).

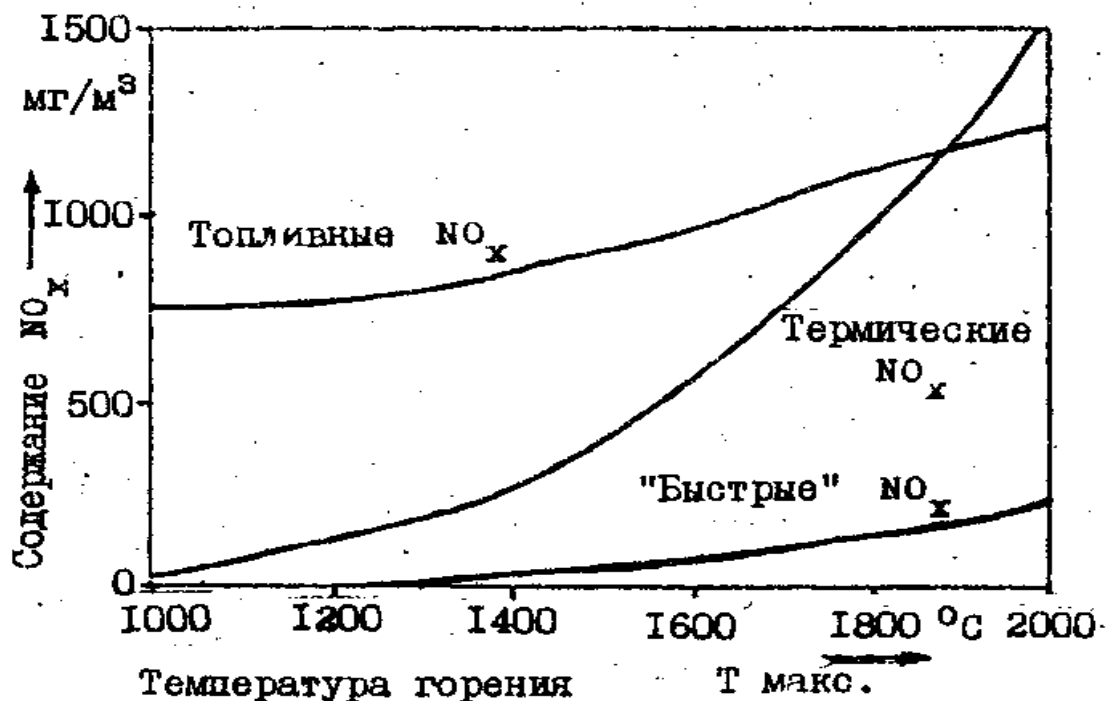


Рисунок 8 – Эмиссия  $\text{NO}_x$  при сжигании пыли каменного угля

Из графика видно, что топливные и быстрые  $\text{NO}_x$  слабо зависят от температуры.

Снижение выбросов оксидов азота возможно добиться двумя основными путями:

I. технологическое подавление образования;

II. очистка дымовых газов

#### 1.24 ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ПОДАВЛЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ $\text{NO}_x$ . РЕЦИРКУЛЯЦИЯ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ

В таблице 8. приведена характеристика основных технологических приемов подавления процессов образования  $\text{NO}_x$ .

Таблица 8. Эффективность применения различных способов снижения концентрации оксидов азота в продуктах сгорания топлива

Способ	Уменьшение выбросов при сжигании, %			Примечание
	Природ. газ	Мазут	Уголь	
Рециркуляция продуктов сгорания	60	20	—	Максимальный эффект достигается при подаче рециркулянта через воздушный тракт горелки. КПД котлоагрегата снижается на 0,5%
Ступенчатое сжигание	55	40	40	Требуется проведение специальных мероприятий по поддержанию минимальных концентраций СО и сажи в уходящих газах
Сжигание с малыми избытками воздуха	20	20	20	—
Снижение объемной плотности теплового потока в топочном объеме	20	20	20	—
Комбинация ступенчатого сжигания и малых избытков воздуха при сниженных тепловых нагрузках	50	35	40	—
Уменьшение подогрева воздуха	50	40	неприменим	Неэкономичное мероприятие
Впрыск пара (воды) в топку	60	40	То же	Опыт промышленной эксплуатации отсутствует
Впрыск воды через форсунку, работающую на водо-мазутной эмульсии	20-50	20-50	20-50	Требуется установки специальных смесителей и добавлений ПАВ

#### Рециркуляция дымовых газов

Рециркуляция дымовых газов находит применение в газوماзутных котлах. Подача некоторой части дымовых газов из газохода за котлом в ядро горения уменьшает максимальную температуру и действующую концентрацию кислорода. Результатом этого является снижение количества оксидов азота в продуктах сгорания.

Эффективность этого метода подавления  $\text{NO}_x$  определяется не только количеством рециркулирующих дымовых газов, но также способом их подачи в ядро горения и уровнем температуры в топке до ввода газов рециркуляции. При низкотемпературном сжигании эффективность рециркуляции может оказаться незначительной (температура при сжигании твердых углей и так (без рециркуляции) невелика), но при сжигании газа и мазута в высоконапряженных топках даже умеренная рециркуляция дымовых газов позволяет в 3–4 раза снизить выбросы  $\text{NO}_x$ .

Для пылеугольных котлов рециркуляция газов практически неприменима (– почему?). На пылеугольных котлах эффект от рециркуляции может быть получен только в случае замещения этими газами первичного воздуха, транспортирующего угольную пыль к горелкам.

Для котлов с жидким шлакоудалением рециркуляция нежелательна, так как высокий уровень температуры здесь необходим для надежного выхода жидкого шлака.

Еще в конце 70-х годов XX в. для решения проблемы выбросов  $\text{NO}_x$  на газомазутных котлах широкое распространение получил.

## 1.25 ОЧИСТКА ДЫМОВЫХ ГАЗОВ ОТ ОКСИДОВ АЗОТА

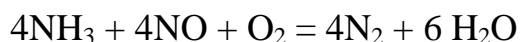
Кроме описанных выше технологических методов подавления  $\text{NO}_x$  известны и освоены в промышленном масштабе методы очистки дымовых газов от оксидов азота. Практическое применение в энергетике нашли лишь две технологии очистки: селективное каталитическое восстановление (СКВ) и селективное некаталитическое восстановление (СНКВ) с использованием аммиака, аммиачной воды или мочевины.

Эффективность этих методов очистки достаточно высока: метод СКВ, например, позволяет снизить выбросы  $\text{NO}_x$  на 90%. Другим важным достоинством указанных методов очистки дымовых газов является отсутствие побочных продуктов, так как в результате взаимодействия  $\text{NO}$  с аммиаком образуются безвредные водяные пары и азот  $\text{N}_2$ .

К сожалению, большие капитальные затраты (особенно в случае применения СКВ) и эксплуатационные расходы (связанные с высокой стоимостью мочевины или аммиака), а также дополнительные требования, усложняющие эксплуатацию котельных установок, препятствуют широкому внедрению методов очистки дымовых газов от  $\text{NO}_x$  на электростанциях (РФ и Белоруссии).

### Селективное каталитическое восстановление оксидов азота

Процесс основан на селективном протекании химической реакции оксидов азота с аммиаком:



Дымовые газы в смеси с аммиаком и воздухом проходят в реакторе через катализатор при температуре 300–400°C.

Смонтированные установки очищают дымовые газы с расходом от 2000 до 2 500 000  $\text{нм}^3/\text{ч}$ . Их располагают либо сразу за экономайзером (для газомазутных котлов, а также для пылеугольных с низким содержанием золы), либо после электрофильтра или после сероочистки (для высокосернистых топлив и углей с высоким содержанием золы).

### Селективное некаталитическое восстановление оксидов азота

Принципиальное различие технологий СКВ и СНКВ заключается в том, что в процессах СКВ эффективное восстановление  $\text{NO}_x$  происходит на поверхности катализатора при температуре 200–400 °С, а в процессах СНКВ — в газовой фазе при температуре 850–1050 °С.

Этот метод не требует крупных затрат, связанных с приобретением катализатора и оборудования для его размещения. В связи с этим, по разным оценкам, стоимость строительства систем СНКВ примерно на порядок ниже, чем установок СКВ.

Установки СНКВ очищают дымовые газы с расходом от 10 000 до 400 000 м<sup>3</sup>/ч. Эффективность очистки газов в промышленных условиях составляет от 75 до 90 %.

Недостатками этого метода является повышенный проскок аммиака при температуре газов ниже 950°С, который не только загрязняет атмосферу, но и при сжигании серосодержащего топлива еще и забивает воздухоподогреватель из-за образования гидросульфата аммония  $\text{NH}_4\text{HSO}_4$ .

Для устранения недостатков обоих методов была разработана гибридная схема, объединяющая СКВ и СНКВ. Экспериментальные исследования показали, что гибридная схема оказывается оптимальным решением проблемы выбросов  $\text{NO}_x$ .

#### 1.26 ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМЫЕ КОНЦЕНТРАЦИИ (ПДК).

В большинстве промышленно развитых стран мира законодательно ограничивают выбросы загрязняющих веществ в атмосферу.

Критерием этих ограничений являются предельно допустимые концентрации (ПДК) различных веществ в приземном слое атмосферы.

При установлении нормативов ПДК для каждого вещества в отдельности обычно исходят из того, что наличие в атмосферном воздухе соответствующего вещества не оказывает никаких негативных воздействий на:

- человека;
- животный и растительный мир;
- климат;
- состояние атмосферы и т.п.

**Предельно допустимая концентрация** – это максимальная концентрация вещества в атмосферном воздухе (мг/м<sup>3</sup>), которая не оказывает на человека прямого или косвенного вредного воздействия, не влияет на его самочувствие и не снижает работоспособности (включая отдаленные последствия).

Показатель ПДК устанавливается соответствующими органами санитарной гигиены.

В 1951 году были утверждены ПДК для 10 наиболее распространенных веществ, выбрасываемых в атмосферу. Это были первые в мире нормативы качества атмосферного воздуха. В начале 1970-х годов перечень ПДК составлял 600 названий токсикантов, в середине 1990-х–2000. В настоящее время в РБ действуют нормативы ПДК более чем по 400 веществам.

Согласно санитарно-гигиеническим нормам, токсико-химические вещества подразделяются на четыре класса опасности:

- 1) **чрезвычайно опасные** (бензапирен, свинец, ртуть, мышьяк и др.);
- 2) **особо опасные** (фенол, бензол, HCl, HF, диоксид азота, формальдегид и др.);
- 3) **умеренно-опасные** (диоксид серы, монооксид азота, метанол, углеводороды, сажа и др.);
- 4) **малоопасные** (аммиак, ацетон, оксид углерода и др.)

По санитарным нормам установлены ПДК загрязняющих веществ:

1. для рабочей зоны;
2. для воздуха из систем вентиляции;
3. для населенных пунктов;
4. для территорий курортов, зон отдыха.

Нормативы загрязнения воздуха не должны превышать 0,8 ПДК.

ПДК в атмосферном воздухе для населенных пунктов подразделяют на **максимально-разовые** (ПДК<sub>м.р.</sub>), при которых не проявляются реакции людей на загрязнение воздуха при 30 минутном воздействии на них и **среднесуточные** (ПДК<sub>с.с.</sub>) – без отрицательных последствий при неограниченно длительном воздействии. В США установлена **среднегодовая** ПДК NO<sub>2</sub>, составляющая 0,1 мг/м<sup>3</sup>

Нужно отметить, что нормативы ПДК в разных странах по одинаковым веществам довольно сильно различаются. Для сравнения приведем **максимально допустимые концентрации** некоторых загрязняющих веществ в воздухе населенных пунктов отдельных стран (табл. 9.)

Таблица 9.

Загрязняющее вещество	ПДК <sub>м.р.</sub> загрязняющих веществ, мг/м <sup>3</sup>				
	СССР	США	ФРГ	Венгрия	РБ
Диоксид серы	0,15	0,26	0,40	0,15	0,5
Диоксид азота	0,085	0,45	1	0,085	0,25
Оксид углерода	1	16,5	-	1	5
Пыль	0,15	0,20	-	0,15	0,3

В Республике Беларусь загрязняющие вещества, выбрасываемые в атмосферу источниками тепла, имеют следующие санитарно-гигиенические характеристики (табл. 10):

Таблица 10

Наименование веществ	ПДК, мг/м <sup>3</sup>		Класс опасности
	максимально-разовые	среднесуточные	
Диоксид серы	0,5	0,2	3
Диоксид азота	0,25	0,1	2
Монооксид азота	0,4	0,24	3
Оксид углерода	5,0	3,0	4
Мазутная зола (в пересчете на ванадий)	0,02	0,008	2
Зола	0,3	0,15	3

При совместном присутствии эффектом суммации обладают:

- NO<sub>2</sub> и SO<sub>2</sub>
- NO<sub>2</sub> и NO
- SO<sub>2</sub> и мазутная зола (в пересчете на ванадий).

### 1.27 ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМЫЕ ВЫБРОСЫ (ПДВ)

Для достижения санитарно-гигиенических нормативов чистоты атмосферного воздуха в 70-80-е годы в большинстве стран, в том числе и в бывшем СССР, была введена система нормирования предельно допустимых выбросов (ПДВ). Эта система ограничивает абсолютное значение выбрасываемых в атмосферу загрязнителей. Нормы ПДВ периодически пересматриваются с учетом совершенствования технологических процессов, а также появления достаточно эффективных очистительных устройств.

Дополнение санитарно-гигиенических нормативов системой ПДВ позволило более четко оценивать ответственность каждого предприятия за загрязнение атмосферы.

*Предельно допустимый выброс (ПДВ)* – это масса загрязняющего вещества в отходящих газах, максимально допустимая к выбросу в атмосферу в единицу времени.

В бывшем СССР нормы ПДВ были установлены в конце 70-х годов (ГОСТ 17.2.3.02-78).

В настоящее время для действующих предприятий задачу о допустимых выбросах вредных веществ решают местные органы контроля за состоянием атмосферы, которые руководствуются требованием обеспечения ПДК, а также технологическими возможностями промышленных и отопительных котлов.

За рубежом в большинстве промышленно развитых стран имеются общенациональные стандарты по допустимым выбросам в атмосферу для крупных энергетических котлов и, как правило, отсутствуют нормы для очень мелких отопительных котлов, которые обычно работают на газе или дистилляте (очищенном жидком топливе – мелкие котлы, как правило, устанавливаются для отопления индивидуальных домов и работают они на чистом топливе).

### 1.28 РАССЕЙВАНИЕ ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ В АТМОСФЕРЕ

Совершенствование технологических процессов, применение высокоэффективных систем газоочистки позволяют в значительной мере уменьшить размеры промышленных выбросов в воздушный бассейн.

В то же время полностью уловить пыле- и газообразные примеси в отходящих газах практически невозможно, и выделение в атмосферу некоторой части вредных веществ пока еще неизбежно. Для того чтобы концентрация вредного вещества в приземном слое атмосферы не превышала предельно допустимую максимальную

разовую концентрацию, пылегазовые выбросы подвергаются рассеиванию в атмосфере через высотные трубы.

Источники выброса<sup>12</sup> вредных веществ в атмосферу можно классифицировать по следующим признакам:

а) **В зависимости от высоты  $H$  устья источников выброса вредных веществ над уровнем земной поверхности:**

1. Высокие ( $H \geq 50$  м);
2. Средней высоты ( $H = 10-50$  м);
3. Низкие ( $H = 2-10$  м);
4. Наземные ( $H < 2$  м).

Выбросы из высоких источников поступают в область недеформированного потока и рассеиваются под действием ветра. Выбросы из низких источников поступают в зону аэродинамической тени, положение которой обусловлено близостью земли, влиянием зданий на поток воздуха. Распространение вредностей в этой зоне происходит под действием турбулентной циркуляции. Воздухообмен в данной области с областью недеформированного потока ограничен.

б) **По геометрическим параметрам:**

- точечные (трубы, шахты);
- линейные (транспорт, близко расположенные шахты и др.).

в) **По режиму действия:**

- 1) Непрерывного действия;
- 2) Залповые.

г) **По характеру организации выбросов:**

- 1) Организованные;
- 2) Неорганизованные.

Кроме организованного удаления выбросов через шахты, дымовые трубы и др., имеются неорганизованные выбросы, проникающие в атмосферный воздух через неплотности технологического оборудования, проемы в результате распыления сырья и материалов.

Рассмотрим, как выглядит схема распределения концентрации вредных веществ в атмосфере от организованного высокого источника выброса (рис.9).

По мере удаления от трубы в направлении распространения промышленных выбросов концентрация вредных веществ в приземном слое атмосферы<sup>13</sup> сначала возрастает, достигает максимума и затем медленно убывает, что позволяет говорить о наличии трех зон неодинакового загрязнения атмосферы: зона ***переброса факела выбросов***, характеризующаяся относительно невысоким содержанием вредных веществ в приземном слое атмосферы; ***зона задымления*** – зона максимального содержания вредных веществ и ***зона постепенного снижения уровня загрязнения***.

---

<sup>12</sup> Источники выброса – это трубы, шахты, а вот источники выделения – это различное технологическое оборудование (котлы, печи и тп)! Не путать!

<sup>13</sup> Приземный слой атмосферы – 2 м от поверхности земли.



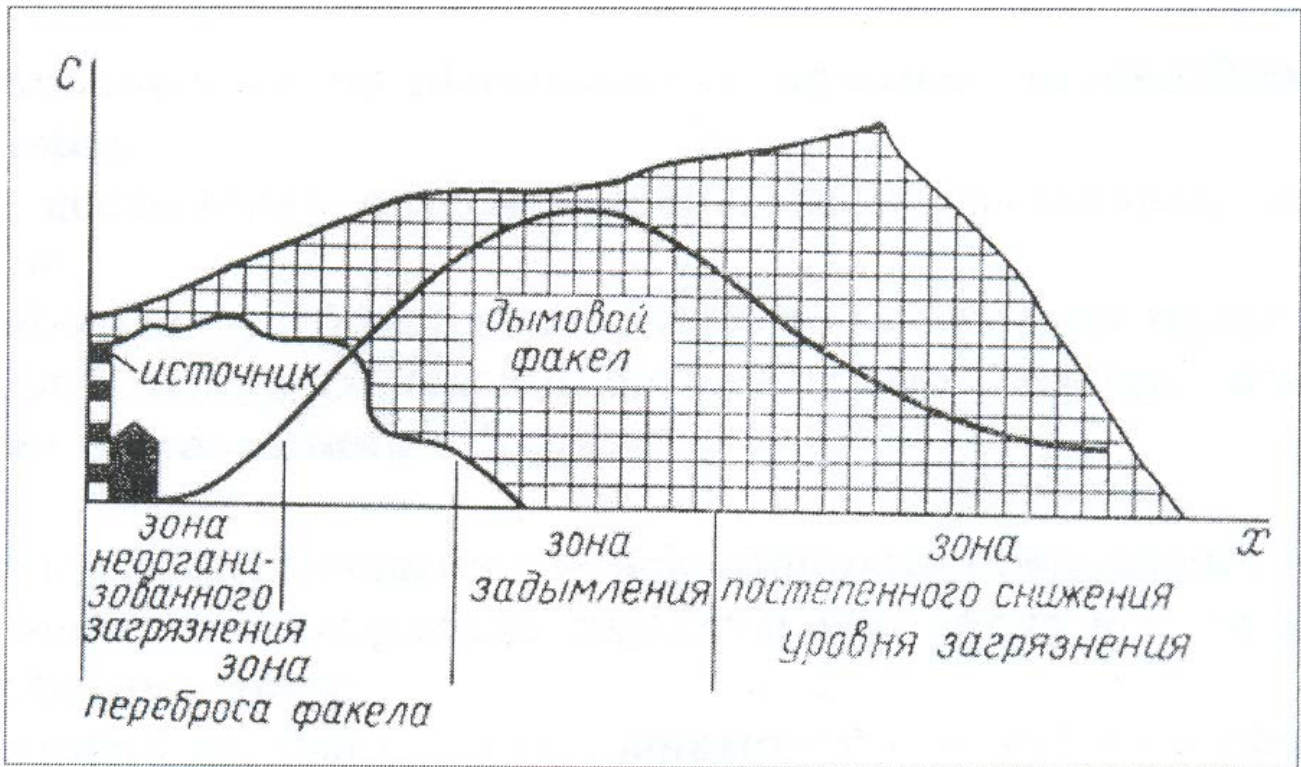


Рисунок 9 – Распределение концентрации вредных веществ в атмосфере от организованного источника выброса.

## 1.29 ВОЗДЕЙСТВИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ГИДРОСФЕРУ

Эксплуатация ТЭС и АЭС связана с использованием большого количества воды. Основная часть воды (более 90%) расходуется в системах охлаждения различных аппаратов: конденсаторов турбин, масло и воздухоохладителей, движущихся механизмов и др.

Сточной водой является любой поток воды, выводимый из цикла электростанции.

К сточным, или сбросным водам кроме вод систем охлаждения относятся: сбросные воды систем гидрозолоулавливания (ГЗУ), отработавшие растворы после химических промывок теплосилового оборудования или его консервации; регенерационные и шламовые воды от водоочистительных (водоподготовительных) установок; нефтезагрязненные стоки, растворы и суспензии, возникающие при обмывах наружных поверхностей нагрева, главным образом воздухоподогревателей и водяных экономайзеров котлов, сжигающих сернистый мазут.

Составы перечисленных стоков различны и определяются типом ТЭС (АЭС) и основного оборудования, ее мощностью, видом топлива, составом исходной воды, способом водоподготовки в основном производстве и, конечно, уровнем эксплуатации.

Воды после охлаждения конденсаторов турбин и воздухоохлаждателей несут, как правило, только так называемое тепловое загрязнение, так как их температура на 8-10°C превышает температуру воды в водоисточнике. В некоторых случаях охлаждающие воды могут вносить в природные водоемы и посторонние вещества. Это обусловлено тем, что в систему охлаждения включены также и маслоохладители, нарушение плотности которых может приводить к проникновению нефтепродуктов (масел) в охлаждающую воду. На мазутных ТЭС образуются сточные воды, содержащие мазут.

Масла могут попадать в точные воды также из главного корпуса, гаражей, открытых распределительных устройств, маслохозяйств.

Количество вод систем охлаждения определяется в основном количеством отработавшего пара, поступающего в конденсаторы турбин. Следовательно, больше всего этих вод на конденсационных ТЭС и (КЭС) и АЭС, где количество воды (т/ч), охлаждающей конденсаторы турбин, может быть найдено по формуле  $Q=KW$ , где  $W$ -мощность станции, МВт;  $K$ -коэффициент, для ТЭС  $K=100-150$ ; для АЭС  $150-200$ .

На электростанциях, использующих твердое топливо, удаление значительных количеств золы и шлака выполняется обычно гидравлическим способом, что требует большого количества воды. На ТЭС мощностью 4000МВт, работающей на Экибастузском угле, сжигается до 4000 т/ч этого топлива, при этом образуется около 1600-1700 т/ч золы. Для эвакуации этого количества со станции требуется не менее 8000 м<sup>3</sup>/ч воды. Поэтому основным направлением в этой области является создание оборотных систем ГЗУ, когда освободившаяся от золы и шлака осветленная вода направляется вновь на ТЭС в систему ГЗУ.

Сбросные воды ГЗУ значительно загрязнены взвешенными веществами, имеют повышенную минерализацию и в большинстве случаев повышенную щелочность. Кроме того, в них могут содержаться соединения фтора, мышьяка, ртути, ванадия.

Стоки после химической промывки или консервации теплосилового оборудования весьма разнообразны по своему составу вследствие обилия промывочных растворов. Для промывок применяются соляная, серная, плавиковая, сульфаминовая минеральные кислоты, а также органические кислоты: лимонная, ортофталевая, адипиновая, щавелевая, муравьиная, уксусная и др. Наряду с ними используются трилон Б, различные ингибиторы коррозии, поверхностно-активные вещества, тиомочевина, гидразин, нитриты, аммиак.

В результате химических реакций в процессе промывок или консервации оборудования могут сбрасываться различные органические и неорганические кислоты, щелочи, нитраты, соли аммония, железа, меди, трилон Б, ингибиторы, гидразин, фтор, уротропин, каптакс и тд. Такое разнообразие химических веществ требует индивидуального решения нейтрализации и захоронения токсичных отходов химических промывок.

Воды от обмывки наружных поверхностей нагрева образуются только на ТЭС, использующих в качестве основного топлива сернистый мазут. Следует иметь в виду, что обезвреживание этих обмывочных растворов сопровождается получением шламов, содержащих ценные вещества-соединения ванадия и никеля.

При эксплуатации водоподготовки обессоленной воды на ТЭС и АЭС возникают стоки от склада реагентов, промывок механических фильтров, удаления шламо-

вых вод осветлителей, регенерации ионитовых фильтров. Эти воды несут значительное количество солей кальция, магния, натрия, алюминия, железа. Например, на ТЭЦ, имеющей производительность химводоочистки 2000 т/ч, сбрасывается солей 2,5 т/ч.

С предочистки (механические фильтры и осветлители) сбрасываются нетоксичные осадки – карбонат кальция, гидроксид железа и алюминия, кремнекислота, органические вещества, глинистые частицы.

И, наконец, на электростанциях, использующих в системах смазки и регулирования паровых турбин огнестойкие жидкости типа иввиоль или ОМТИ, образуется небольшое количество сточной воды, загрязненной этим веществом.

Основным законодательным документом, регламентирующим условия водопользования, является «Основы водного законодательства Союза ССР и союзных республик» (1970г.) Порядок ведения государственного учета вод определяется «Положением о государственном учете вод и их использовании» (1975г.) Основным нормативным документом, устанавливающим систему охраны поверхностных вод, служат «Правила охраны поверхностных вод от загрязнения сточными водами» (1974г.).

### **1.30 ВЛИЯНИЕ СТОЧНЫХ ВОД ТЭС НА ПРИРОДНЫЕ ВОДОЕМЫ**

Природные водоемы представляют собой сложные экологические системы (экосистемы) существования биоценоза – сообщества живых организмов (животных и растений). Эти системы создавались в течение многих тысячелетий эволюции живого мира. Водоемы являются не только сборниками и хранилищами воды, в которых вода усредняется по качеству, но в них непрерывно протекают процессы изменения состава примесей – приближение к равновесию. Оно может быть нарушено в результате человеческой деятельности, в частности сброса сточных вод ТЭС.

Живые организмы (гидробионты), населяющие водоемы, тесно связаны между собой условиями жизни, и в первую очередь ресурсами питания.

Гидробионты играют основную роль в процессе самоочищения водоемов. Часть гидробионтов (обычно растения) синтезируют органические вещества, используя при этом неорганические соединения из окружающей среды, такие как углекислый газ, аммиак и др.

Другие гидробионты (обычно животные) усваивают готовые органические вещества. Водоросли также минерализуют органические вещества. В процессе фотосинтеза они при этом выделяют кислород. Основная часть кислорода поступает в водоем путем аэрации при контакте воды с воздухом.

Микроорганизмы (бактерии) интенсифицируют процесс минерализации органики при окислении ее кислородом. Отклонение экосистемы от равновесного состояния, вызванное, например, сбросом сточных вод, может привести к отравлению и даже гибели определенного вида (популяции) живых организмов, которое приведет к цепной реакции угнетения всего биоценоза. Отклонение от равновесия интенсифицирует процессы, приводящие водоем в оптимальное состояние, которые называют процессами самоочищения водоема.

Важнейшие из этих процессов следующие: осаждение грубодисперсных и коагуляция коллоидных примесей; окисление (минерализация) органических примесей; окисление минеральных примесей кислорода; нейтрализация кислот и оснований за счет буферной емкости воды водоема (щелочности), приводящая к изменению ее рН; гидролиз ионов тяжелых металлов, приводящих к образованию их малорастворимых гидроокисей и выделению их из воды; установление углекислотного равновесия (стабилизация) в воде, сопровождающееся или выделением твердой фазы (карбоната кальция) или переходом части ее в воду.

Процессы самоочищения водоемов зависят от гидробиологической и гидрохимической обстановки в них. Основными факторами, существенно влияющими на водоемы, являются температура воды, минералогический состав примесей, концентрация кислорода рН воды, концентрации вредных примесей, препятствующих или затрудняющих протеканию процессов самоочищения водоемов.

Для гидробионтов наиболее благоприятен показатель рН=6,5-8,5. Так как сбросы воды из систем охлаждения оборудования ТЭС несут в основном «тепловое» загрязнение, следует иметь в виду, что температура оказывает мощное воздействие на биоценоз в водоеме.

Восприимчивость живых организмов к токсичным веществам с повышением температуры обычно увеличивается. При повышении температуры до +30 С сокращается прирост водорослей, поражается фауна, рыбы становятся малоподвижными и перестают кормиться. Кроме того, с ростом температуры уменьшается растворимость кислорода в воде.

Резкий перепад температур, который возникает при сбросе в водоем нагретых вод, приводит к гибели рыбы и представляет серьезную угрозу рыбному хозяйству.

### **1.31 ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД**

К физико-химическим методам очистки сточных вод относят:

- 1. коагуляцию;**
- 2. флокуляцию;**
- 3. флотацию;**
- 4. адсорбцию;**
- 5. ионный обмен;**
- 6. экстракцию;**
- 8. обратный осмос;**
- 9. электрохимические методы**
- 10. выпаривание (дистилляцию);**
- 11. кристаллизацию;**

Эти методы используют для удаления из сточных вод тонкодисперсных (коллоидные растворы или коллоидные системы) взвешенных частиц (твердых и жидких), растворимых газов.

Использование физико-химических методов очистки сточных вод по сравнению с биохимическими имеет ряд преимуществ:

- 1) возможность удаления из сточных вод токсичных, биохимически неокисляемых органических соединений;
- 2) меньшие размеры сооружений;
- 3) возможность полной автоматизации;
- 4) методы не связаны с контролем за деятельностью живых организмов.

### КОАГУЛЯЦИЯ

**Коагуляция** – это процесс укрупнения дисперсных частиц в результате их взаимодействия и объединения в агрегаты.

В процессах очистки сточных вод коагуляция происходит под влиянием добавляемых к ним специальных веществ – *коагулянтов*.

Коагулянты в воде образуют хлопья гидроксидов металлов, которые быстро оседают под действием силы тяжести. Хлопья обладают способностью улавливать коллоидные и взвешенные частицы и агрегировать их. Так как коллоидные частицы имеют слабый отрицательный заряд, а хлопья коагулянтов слабый положительный заряд, то между ними возникает взаимное притяжение.

В качестве коагулянтов обычно используют соли алюминия, железа или их смеси.

Коагулирующее действие солей есть результат гидролиза, который происходит вслед за растворением.

### ФЛОКУЛЯЦИЯ

**Флокуляция** – это процесс агрегации взвешенных частиц при добавлении в сточную воду высокомолекулярных соединений, называемых флокулянтами.

Флокуляцию проводят для интенсификации процесса коагуляции с целью повышения скорости осаждения хлопьев гидроксидов алюминия и железа (молекулы флокулянта адсорбируются на поверхности коллоидных частиц, утяжеляя их).

### ФЛОТАЦИЯ

Флотация является сложным физико-химическим процессом, заключающимся в создании комплекса «частица-пузырек воздуха или газа», всплывании этого комплекса и удалении образовавшегося пенного слоя.

В зависимости от способа получения пузырьков в воде существуют следующие способы флотационной очистки:

- флотация пузырьками, образующимися путем механического дробления воздуха (механическими турбинами-импеллерами, форсунками, с помощью пористых пластин);
- флотация пузырьками, образующимися из пересыщенных растворов воздуха в воде (вакуумная, напорная);
- электрофлотация.

Процесс очистки стоков при флотации заключается в следующем: поток жидкости и поток воздуха (мелких пузырьков) в большинстве случаев движутся в одном направлении. Взвешенные частицы загрязнений находятся во всем объеме сточной воды и при совместном движении с пузырьками воздуха происходит агрегирование частицы с воздухом. Если пузырьки воздуха значительных размеров, то скорости воздушного пузырька и загрязненной частицы различаются так сильно, что ча-

стицы не могут закрепиться на поверхности воздушного пузырька. Кроме того, большие воздушные пузырьки при быстром движении сильно перемешивают воду, вызывая разьединение уже соединенных воздушных пузырьков и загрязненных частиц. Поэтому для нормальной работы флотатора во флотационную камеру не допускаются пузырьки более определенного размера.

### АДСОРБЦИЯ

Адсорбционные методы применяют для глубокой очистки сточных вод от растворенных органических веществ после биохимической очистки.

Адсорбцию используют для обезвреживания сточных вод от фенолов, гербицидов, пестицидов, ПАВ, красителей.

В качестве адсорбентов используют активные угли, некоторые отходы производства (золу, шлаки, опилки). Эффективность адсорбционной очистки достигает 80–95%.

### ИОННЫЙ ОБМЕН

**Ионный обмен** представляет собой процесс взаимодействия раствора с твердой фазой, обладающей свойствами обменивать ионы, содержащиеся в ней, на другие ионы, присутствующие в растворе.

Вещества, составляющие эту твердую фазу, носят название *ионитов*.

К ионитам относятся цеолиты, глинистые минералы, полевые шпаты, различные слюды, гуминовые кислоты почв и углей, ионообменные смолы и т.д.

Ионообменная очистка применяется для извлечения из сточных вод металлов (цинка, меди, хрома, никеля, свинца, ртути, кадмия, ванадия, марганца).

### ЭКСТРАКЦИЯ

Экстракционный метод очистки производственных сточных вод основан на распределении загрязняющего вещества в смеси двух взаимонерастворимых жидкостей соответственно его растворимости в них. Эффективным методом очистки является экстракция органическими растворителями — экстрагентами.

Экстракция может быть экономически выгодным процессом, если стоимость извлекаемых веществ<sup>14</sup> компенсирует все затраты на его проведение. В общем случае для большинства веществ можно считать, что при концентрации выше 3–4 г\л их рационально извлекать экстракцией, чем адсорбцией.

#### **Химические методы:**

- окисление и восстановление вредных примесей
- нейтрализация.

## 1.32 БИОЛОГИЧЕСКАЯ ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД

Часть окисляемого микроорганизмами вещества используется для увеличения биомассы и для размножения этих организмов, а другая превращается в безвредные продукты окисления – воду, диоксиды углерода, азота и др.

---

<sup>14</sup> Жидкостную экстракцию применяют для очистки сточных вод, содержащих фенолы, масла, органические кислоты, ионы металлов.

Для создания новых клеток микроорганизмы используют углерод (С), водород (Н), серу (S) и микроэлементы, которые они получают из разрушаемых органических веществ. Недостающие для построения клеток элементы, чаще всего азот (N), фосфор (P) и калий (K), приходится добавлять в очищаемые стоки в виде солей или очищать производственные сточные воды совместно с бытовыми.

Микроорганизмы, которые участвуют в процессе биологической очистки, формируются в виде *активного ила* или *биопленки*. *Активный ил* имеет вид бурожелтых мелких хлопьев размером 3–150 мкм, взвешенных в воде и представляющих собой колонии живых микроорганизмов, в том числе бактерий, образующих слизистые капсулы (зооглеи). *Биопленка* – это слизистые обрастания живыми микроорганизмами фильтрующего материала очистных сооружений.

Микроорганизмы, образующие ил и биопленку, весьма разнообразны, но каждый вид бактерий способен окислять преимущественно определенные вещества. Поэтому, если в сточные воды будут введены новые вещества, то понадобится некоторое время, чтобы бактерии, способные использовать именно эти вещества, размножились в достаточном количестве и смогли обеспечить наилучшую очистку.

Для окисления органических веществ микроорганизмам необходим  $O_2$ . Для насыщения сточной воды кислородом ее аэрируют, разбивая воздушный поток на пузырьки, которые как можно более равномерно распределяют в объеме сточной воды. Недостаточная подача воздуха замедляет процесс очистки. Питательными веществами для микроорганизмов активного ила являются загрязняющие воду органические вещества, однако избыточная их концентрация в сточных водах может умертвить микроорганизмы. Но отсутствие в стоках достаточного количества веществ, необходимых для питания и построения новой биомассы, также вызывает отмирание микроорганизмов.

Большое значение имеет температурный режим биологической очистки. На практике температуру поддерживают в пределах экологического оптимума (20–30°C).

Биологическая очистка сточных вод осуществляется при помощи живых организмов разного уровня организации.

Метод биологической очистки получил широкое распространение в химической, нефтехимической, нефтеперерабатывающей промышленности.

Этот метод основан на способности некоторых микроорганизмов питаться растворенными в воде органическими и некоторыми неорганическими веществами.

Для сохранения интенсивности процесса очистки в зимнее время поддерживают более высокую концентрацию активного ила в воде и обеспечивают более интенсивную аэрацию.

Наиболее благоприятной средой для бактерий является нейтральная или слабощелочная. При  $9 < pH > 5$  эффективность очистки резко снижается. Концентрация ила поддерживается в пределах 2–4 г/л.

На практике используют 2 метода биологической очистки сточных вод – **аэробный** и **анаэробный**.

**Аэробные** процессы биохимической очистки сточных вод могут протекать в естественных условиях на полях орошения, полях фильтрации и в биологических прудах.

*Поля орошения* – это специально подготовленные земельные участки, используемые одновременно для очистки сточных вод и агрокультурных целей. Очистка в этих условиях идет под действием почвенной микрофлоры, солнца, воздуха и под влиянием жизнедеятельности растений.

*Поля фильтрации* – это участки земли, предназначенные для полной биологической очистки предварительно осветленных сточных вод. При очистке сточных вод на полях фильтрации используется самоочищающаяся способность почвы.

*Биологические пруды* – представляют собой каскад прудов, состоящих из трех – пяти ступеней, через которые с небольшой скоростью протекает осветленная или биологически очищенная сточная вода. Процесс очистки в этих сооружениях аналогичен процессам, происходящим при самоочищении водоемов. В прудах осуществляется доочистка предварительно очищенных сточных вод (заключительный этап биологической очистки).

Естественные процессы биологической очистки являются экстенсивными, и в настоящее время они гораздо реже используются в практике очистки промышленных сточных вод.

К искусственным сооружениям биологической очистки относятся биофильтры, аэротенки и окситенки.

*Биологический фильтр* – очистное сооружение, заполненное загрузкиным материалом, через который фильтруется сточная вода и на поверхности которого развивается биологическая пленка, состоящая преимущественно из аэробных микроорганизмов.

Биофильтры имеют много недостатков. Управлять процессом очистки в них можно только, регулируя подачу воды; они заиливаются, отчего резко падает их окислительная способность; в процессе работы биофильтра возникают неприятные запахи; в них заводятся личинки мух, которые разрыхляют биопленку, и ее уносит водой. Для борьбы с личинками мух биофильтры обрабатывают ядохимикатами, что дополнительно загрязнит сточные воды токсичными веществами и т.д.

*Окситенки* – сооружения, в которых очищение сточных вод осуществляется с применением аэрации чистым кислородом или воздухом, обогащенным кислородом.

*Аэротенки* – сооружения, представляющие собой проточные резервуары с активным илом, снабженные устройствами для аэрации содержимого.

Окислительная мощность окситенков оказывается выше, чем у аэротенков, в 5-6 раз. Этот способ целесообразно использовать на тех предприятиях, где имеется собственный технический кислород, или он может быть получен с соседних химических предприятий.

Процесс очистки сточных вод в аэротенках весьма сложен, требует постоянного контроля и управления.

На существующих сооружениях биологической очистки чрезвычайно трудно поддерживать равномерное пространственное распределение микроорганизмов на каждом последующем участке по ходу процесса очистки. В системах биологической очистки требуется непрерывный круглосуточный контроль за физико-химическими параметрами поступающих сточных вод, условиями в экосистеме очистного сооружения и т.д.



Разрешить эти трудности позволяет метод *иммобилизации* (прикрепления) микроорганизмов-деструкторов специфических загрязнителей на поверхности носителя-сорбента, не растворимого в воде и не реагирующего с загрязнителями. В этом случае очистка проходит как за счет сорбционного изъятия загрязнений, так и за счет биохимического окисления их микроорганизмами. Процесс очистки сточных вод, сочетающий два распространенных метода – сорбцию и биохимическое окисление, – получил название *биосорбционной очистки*. Он позволяет проводить более глубокую очистку сточных вод за счет комплексного изъятия загрязнений (трудноокисляемые соединения сорбируются на поверхности носителя, а вещества, обладающие плохой сорбционной способностью, окисляются биохимическим путем.).

**Анаэробный метод** биологической очистки основан на использовании бактерий, не нуждающихся в кислороде, и заключается в сбраживании загрязняющих воду органических веществ в закрытых аппаратах без доступа воздуха – метантеках.

*Метантеки* – закрытые большие резервуары, загружаемые иловыми осадками из отстойников. Благодаря искусственному подогреву массы в метантенках развивается огромное количество анаэробных бактерий, в результате жизнедеятельности которых происходит распад белков до аминокислот и аммиака с выделением сероводорода, а также сбраживание жирных кислот с образованием диоксида углерода, метана и водорода. Выделяющиеся в результате анаэробного брожения различные горючие газы отводятся для подогрева закладываемых в метантеки масс из отстойника.

Применение этого метода ограничено, его обычно используют для предварительной подготовки сточных вод, чтобы снизить концентрацию органических загрязнителей в 10–20 раз, а затем проводить дальнейшую очистку же аэробными способами. Однако из-за сложности такого двухступенчатого процесса анаэробный метод редко применяется на практике. Наиболее перспективно его использование для сбраживания осадков и избыточного активного ила в метантеках с получением биогаза.

### 1.33 РОЛЬ АВТОТРАНСПОРТА В ЗАГРЯЗНЕНИИ ГОРОДОВ

К мобильным источникам относятся автомобили и транспортные механизмы, передвигающиеся по земле, по воде и по воздуху. В больших городах к числу основных источников загрязнения атмосферного воздуха относится автотранспорт.

В настоящее время на долю автомобильного транспорта приходится больше половины всех вредных выбросов в окружающую среду, которые являются главным источником загрязнения атмосферы особенно в крупных городах. В среднем при пробеге 15 тыс. км за год каждый автомобиль сжигает 2 т топлива и около 26–30 т воздуха, в том числе 4,5 т кислорода, что в 50 раз больше потребностей человека. При этом автомобиль выбрасывает в атмосферу (кг/год): угарного газа – 700, диоксида азота – 40, несгоревших углеводородов – 230 и твердых веществ – 2–5. Кроме того, выбрасывается много соединений свинца из-за применения в большинстве своем этилированного бензина. Наблюдения показали, что в домах, расположенных рядом с большой дорогой (до 10 м), жители болеют раком в 3 – 4 раза чаще, чем в

домах, удаленных от дороги на расстояние 50 м. Транспорт отравляет также водоемы, почву и растения.

Наземные транспортные средства - это механизмы, передвигающиеся по шоссейным и железным дорогам, а также строительное, сельскохозяйственное и военное оборудование. В соответствии с различиями в количествах и видах выбрасываемых загрязняющих веществ целесообразно рассматривать в отдельности двигатели внутреннего сгорания (особенно двух- и четырехтактные) и дизели и, аналогичным образом, паровые и дизельные локомотивы. Четырехтактный двигатель внутреннего сгорания имеют автомобили, автобусы и самолеты; двухтактный двигатель внутреннего сгорания - мотоциклы, вспомогательные моторы; дизельный тип двигателя у автобусов, тракторов, машин; газовые турбины имеют самолеты, корабли, поезда; паровой котел у кораблей и паровозов.

Вредные вещества при эксплуатации подвижных транспортных средств поступают в воздух с отработавшими газами, испарениями из топливных систем и при заправке, а так же с картерными газами. На выбросы оксида углерода значительное влияние оказывает рельеф дороги и режим движения автомашины. Так, например, при ускорении и торможении в отработавших газах увеличивается содержание оксида углерода почти в 8 раз. Минимальное количество оксида углерода выделяется при равномерной скорости автомобиля 60 км/ч. В таблице 11 приведены значения концентрации основных примесей карбюраторного двигателя при различных режимах его работы.

Таблица 11. Концентрация веществ в зависимости от режима работы карбюраторного двигателя.

Режим работы двигателя	Оксид углерода, в % по объему	Углеводороды, мг/л	Оксиды азота, мг/л
Холостой ход	4-12	2-6	-
Принудительный холостой ход	2-4	8-12	-
Средние нагрузки	0-1	0,8-1,5	2,5-4
Полные нагрузки	2	0,7-0,8	4-8

Состав и объемы выбросов зависят во многом от типа двигателя. В таблице 12 показаны выбросы ряда вредных веществ карбюраторного и дизельного двигателей.

Таблица 12. Выбросы (в %, по объему) веществ при работе дизельных и карбюраторных двигателей.

Вещество	Карбюраторный двигатель	Дизельный двигатель
Оксид углерода	0,5-12	0,01-0,5
Оксид азота	0,005-0,8	0,002-0,5
Углеводороды	0,2-0,3	0,009-0,5
Бензапирен	до 20 мкг/м <sup>3</sup>	до 10 мкг/м <sup>3</sup>

Как видно из данных таблицы 15 видно, что выбросы основных загрязняющих веществ значительно ниже в дизельных двигателях. Поэтому принято считать их

более экологически чистыми. Однако дизельные двигатели отличаются повышенными выбросами сажи, образующейся вследствие перегрузки топлива. Сажа насыщена канцерогенными углеводородами и микроэлементами; их выбросы в атмосферу недопустимы.

В связи с тем, что отработавшие газы автомобилей поступают в нижний слой атмосферы, а процесс их рассеяния значительно отличается от процесса рассеяния высоких стационарных источников, вредные вещества находятся практически в зоне дыхания человека. Поэтому автомобильный транспорт следует отнести к категории наиболее опасных источников загрязнения атмосферного воздуха вблизи автомагистралей.

### 1.34 ПРОМЫШЛЕННЫЕ ОТХОДЫ

Серьезную экологическую проблему представляют отходы производства и потребления. Твердые отходы, поступающие в окружающую среду, можно подразделить на три категории: промышленные, сельскохозяйственные и отходы городского хозяйства.

В процессе горных разработок, эксплуатации металлургических и химических заводов, тепловых электростанций образуются огромные количества твердых отходов (огарок, шлак, зола и т.п.). Твердые выбросы складываются на больших площадях и в ряде случаев оказывают пагубное воздействие на почву, водные источники и атмосферу (пыление и выделение газов).

Наиболее крупнотоннажными являются отходы энергетики, машиностроения (шлак, шлак, горелая земля), многообразные отходы химических производств и нефтедобычи, отходы гальванопроизводств, осадки сточных вод, отходы деревообработки, твердые бытовые отходы (ТБО).

Классификация отходов основана на систематизации их по отраслям промышленности, возможностям переработки, токсичности и т.д. В каждом конкретном случае характер используемой классификации соответствует рассматриваемым аспектам: складированию, очистке, переработке, захоронению отходов, предотвращению их токсичного воздействия и пр. Каждая отрасль промышленности имеет классификацию собственных отходов.

Классификация отходов возможна по разным показателям, но самым главным из них является степень опасности для человеческого здоровья. Вредными отходами, например, считаются инфекционные, токсичные и радиоактивные. Их сбор и ликвидация регламентируются специальными санитарными правилами.

Согласно стандарту "Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности", все промышленные отходы (ПО) делятся на четыре класса опасности:

Класс	Характеристика вещества (отходов)
Первый	..... чрезвычайно опасные
Второй	..... высоко опасные
Третий	..... умеренно опасные
Четвертый	..... малоопасные

Для примера можно привести класс опасности некоторых химических веществ, определяемый расчетным методом:

- наличие в отходах ртути, сулемы, хромовокислого калия, треххлористой сурьмы, бенз(а)пирена, оксида мышьяка и других высокотоксичных веществ позволяет отнести их к первому классу опасности;

- наличие в отходах хлористой меди, хлористого никеля, трехокисной сурьмы, азотнокислого свинца и других, менее токсичных веществ дает основание отнести эти отходы ко второму классу опасности;

- наличие в отходах сернокислой меди, щавелевокислой меди, хлористого никеля, оксида свинца, четыреххлористого углерода и других веществ позволяет отнести их к третьему классу опасности;

- наличие в отходах сернокислого марганца, фосфатов, сернокислого цинка, хлористого цинка дает основание отнести их к четвертому классу опасности.

Все виды отходов производства и потребления по возможности использования можно разделить, с одной стороны, на вторичные материальные ресурсы (ВМР), которые уже перерабатываются или переработка которых планируется, и, с другой стороны, на отходы, которые на данном этапе развития экономики перерабатывать нецелесообразно и которые неизбежно образуют безвозвратные потери.

### 1.35 СПОСОБЫ УТИЛИЗАЦИИ ОТХОДОВ:

К наиболее распространенным способам утилизации отходов относятся:

Достоинства и недостатки каждого метода приведены в таблице 16.

#### **Рециклинг**

Способ захоронения, с экономической точки зрения, является неэффективным, требуя колоссальных бюджетных затрат. И эти издержки ничем не оправданы с экологической точки зрения: происходит безвозвратная потеря невозполнимых природных ресурсов.

Варианты сбора вторичного сырья в разных странах и территориях могут быть различными в зависимости от местных условий: мусоросборники вблизи дома, специализированные центры сбора вторичного сырья, платные центры сбора. В зависимости от варианта сбора мусора выбирается транспорт для его перевозки. Следующий этап - выбор типа и мощности перерабатывающего предприятия: ряд небольших локальных заводов, крупная компания территориальной единицы или транспортировка сырья на крупное региональное перерабатывающее предприятие.

После разделения ТО на фракции, каждая из фракций поступает на последующую технологическую стадию - стадию переработки в конечный продукт.

Стекло обычно перерабатывают путем измельчения и переплавки (желательно, чтобы исходное стекло было одного цвета). Стекланный бой низкого качества после измельчения используется в качестве наполнителя для строительных материалов (например, «глассфальт»)

Стальные и алюминиевые банки переплавляются с целью получения соответствующего металла.

Бумажные отходы различного типа уже многие десятки лет применяют наряду с обычной целлюлозой для изготовления пульпы – сырья для бумаги. Из смешанных

или низкокачественных бумажных отходов можно изготавливать туалетную или оберточную бумагу и картон. К сожалению, в России только в небольших масштабах присутствует технология производства высококачественной бумаги из высококачественных отходов (обрезков типографий, использованной бумаги для ксероксов и лазерных принтеров и т.д.).

Переработка пластика в целом – более дорогой и сложный процесс. Нужно отметить, что для вторичной переработки используются не все типы полимеров, а лишь некоторые.

Основной проблемой в переработке вторсырья является не отсутствие технологий переработки – современные технологии позволяют переработать до 90% от общего количества отходов – а отделение вторсырья от остального мусора (и разделение различных компонент вторсырья). Существует множество технологий, позволяющих разделять отходы и вторсырье. Самая дорогая и сложная из них – извлечение вторсырья из уже сформировавшегося общего потока отходов на специальных предприятиях.

Таблица 13. Способ утилизации отходов (достоинства и недостатки)

<b>Складирование отходов.</b>	
<b>Достоинства</b>	<b>Недостатки</b>
1. Не требует постоянных и крупных капиталовложений.	1. Затраты на борьбу с последствиями губительного влияния свалок, т.е. на охрану природы, здравоохранение, во много раз превышают расходы на строительство заводов по переработке ТБО.
2. Места складирования отходов могут не обновляться десятилетиями	2. Под всё разрастающиеся свалки, уходят новые огромные территории. Количество свалок непрерывно увеличивается.
3. Позволяют одновременно избавиться от большого количества ТБО или промышленных отходов	3. Разлагающиеся на свалках ТБО и промышленные отходы проникают в почву, тем самым, заражая её. Ядовитые испарения загрязняют воздух. Попадающие в водоемы остатки ТБО губительно сказываются на состоянии воды, вредят флоре и фауне этих водоёмов. Все эти последствия негативно влияют на здоровье человека, нарушают обменные процессы в природе
4. Результаты разрушительного влияния свалок на природу не видны сразу.	4. Последствия разрушительного влияния свалок на природу могут оказаться необратимыми в будущем.
<b>Захоронение отходов.</b>	
1. Позволяет забыть о проблеме утилизации отходов. Создаётся видимость - если закопать ТБО, то они исчезнут.	1. Находящиеся в почве отходы отравляют её, попадая через подземные воды в водоёмы, представляют огромную опасность для человека и животных.
2. Не требуются новые огромные территории.	2. Подземные свалки не заметны, на первый взгляд, но на поверхности земли над ними почва отравлена и разрыхлена, она не пригодна ни для строительства, ни для земледелия, ни для выпаса скота. Более того с поверхности почв над свалка-

	ми часто испаряются едкие токсичные вещества.
3. Не требует постоянных и крупных капиталовложений.	3. Затраты на борьбу с последствиями губительного влияния захоронений отходов, т.е. на охрану природы, здравоохранение, во много раз превышают расходы на строительство заводов по переработке ТБО.
<b>Сливание отходов в водоёмы.</b>	
1. Не требует крупных единовременных капиталовложений	1. Затраты на очистку воды, фильтрацию; ущерб рыболовецкой промышленности, водному транспорту во много раз превысят расходы на строительство заводов по переработке и утилизации ТБО.
2. Слитые отходы быстро распространяются по поверхности воды, быстро оседают на дно, растворяются, создавая видимость чистоты.	2. По поверхности воды, по дну водоёмов продукты разложения отходов распространяются на огромные расстояния, отравляя акваторию, делая её непригодной для жизни рыб, для использования в промышленности. Растворенные в воде едкие, а порой и токсичные отходы крайне опасны для животных и человека.
3. При блокировке мест слива отходов, ядовитые вещества распространяются не сразу и не заметно.	3. Блокировка мест слива отходов внушает людям спокойствие, притупляет бдительность, это приводит к тому, что распространению ядовитых веществ никто не препятствует,
<b>Сжигание мусора.</b>	
1. Позволяет одновременно избавиться от большого количества мусора.	1. Ядовитые газы, выбрасываемые в атмосферу с дымом, провоцируют тяжелые заболевания у людей, способствуют образованию озоновых дыр.
2. Удобно в больших городах и на крупных предприятиях, так как позволяет избавляться от отходов по мере их поступления.	2. Из-за постоянных выбросов дыма в атмосферу над городами и предприятиями образуются плотные дымовые завесы.
	3. После сжигания отходов остаётся ядовитый пепел, который, впоследствии, тоже приходится утилизировать одним из выше перечисленных способов.

**Электронный учебно-методический комплекс**

**Практический раздел**

**ЭКОЛОГИЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

**Практические задания**

**Минск 2020**

## ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАДАНИЯ

### 1.36 РАСЧЕТ ЦИКЛОНА

**Задание:** Выбрать циклон типа ЦН-15 и определить его гидравлическое сопротивление.

**Исходные данные:** расход газа при нормальных условиях  $V_0$ , м<sup>3</sup>/ч; плотность газа при нормальных условиях  $\rho_0$ , кг/м<sup>3</sup>; температура очищаемого газа  $t_r$ , °С, барометрическое давление  $P_{бар}$ , кПа; разрежение при входе в циклон  $P_{ц}$ , кПа; начальная концентрация пыли  $C_1$ , г/м<sup>3</sup>; плотность пыли  $\rho_{п}$ , кг/м<sup>3</sup>. Циклон должен работать без дополнительных устройств в сети.

#### Варианты заданий

№ п/п	$V_0$ , м <sup>3</sup> /ч	$\rho_0$ , кг/м <sup>3</sup>	$t_r$ , °С	$P_{бар}$ , кПа	$P_{ц}$ , кПа	$C_1$ , г/м <sup>3</sup> ;	$\rho_{п}$ , кг/м <sup>3</sup>
1	4100	1,3	140	101,5	30	10	3000
2	5800	1,1	250	100	25	20	2000
3	4600	1,2	150	99	27	80	1500
4	5000	1,25	200	100,5	50	120	2500
5	4200	1,05	180	101,3	20	150	1700
6	4500	1,2	280	98,5	15	40	2600
7	5200	1,26	240	100	22	20	2200
8	7000	1,15	300	99,1	17	10	3300
9	5600	1,3	110	101	30	40	3000

#### Методические указания к расчету циклона:

1. Определяем плотность газа при рабочих условиях:

$$\rho_z = \rho_0 \cdot \frac{273 \cdot (P_{бар} - P_{ц})}{(273 + t_z) \cdot P_{бар}}, \text{ кг/м}^3$$

2. Расход газа при рабочих условиях:

$$V_r = \frac{V_0 \rho_0}{\rho_r 3600}, \text{ м}^3/\text{с}$$

3. Диаметр циклона:

$$D = \sqrt{\frac{V_r}{0,785 v_{опт}}}, \text{ м}$$

где  $v_{опт}$  – оптимальная скорость движения газа, которая для ЦН-15 составляет 3,5 м/с (табл. 1).



Таблица 1.

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

4. Действительная скорость газа в циклоне:

$$v_d = \frac{V_r}{0,785 D^2}, \text{ м/с}$$

Действительная скорость газа в циклоне не должна отличаться от оптимальной более чем на 15%. В случае, если разница в скоростях превышает указанную величину, расчеты повторяют, выбрав циклон другого типа.

5. Коэффициент сопротивления принятого к установке циклона:

$$\zeta = K_1 K_2 \zeta_{500},$$

где  $\zeta_{500}$  – коэффициент сопротивления циклона диаметром 500 мм (табл. 2),  $K_1$  – поправочный коэффициент, учитывающий влияние диаметра циклона (табл. 3). Диаметр циклона превышающий 500 мм не оказывает влияние на коэффициент сопротивления циклона. В этом случае величина  $K_1$  выбирается при  $D = 500$  мм.,  $K_2$  – поправочный коэффициент, учитывающий запыленность газа (табл. 4).

Таблица 2

Тип циклона	$\zeta_{500}$
ЦН-11	245
ЦН-15	155
ЦН-24	75
СДК-ЦН-33	520
СК-ЦН-34	1050

Таблица 3 Значения коэффициента  $K_1$ 

Тип циклона	Диаметр циклона, мм				
	150	200	300	450	500
ЦН-11	0,94	0,95	0,96	0,99	1
ЦН-15, ЦН-24	0,85	0,9	0,93	1	1
СДК-ЦН-33, СК-ЦН-34	1	1	1	1	1

Таблица 4

Тип циклона	Запыленность, г/м <sup>3</sup>						
	0	10	20	40	80	120	150
ЦН-11	1	0,96	0,94	0,92	0,9	0,87	0,85
ЦН-15	1	0,93	0,92	0,91	0,9	0,87	0,68
ЦН-24	1	0,95	0,93	0,92	0,9	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	0,9

6. Гидравлическое сопротивление циклона:

$$\Delta P = \frac{\xi \cdot v_d \cdot \rho_r}{2}, \text{ Па}$$

### 1.37 РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОФИЛЬТРА

**Задание:** Выбрать электрофильтр для очистки дымовых газов барабанной сушилки.

**Исходные данные:** расход газов при нормальных условиях  $V_0$ , м<sup>3</sup>/ч; плотность газов при нормальных условиях  $\rho_0$ , кг/м<sup>3</sup>; температура очищаемых газов  $t_r$ , °С; барометрическое давление  $P_{бар}$ , кПа; разрежение в системе  $P$ , кПа; рабочее напряжение  $U_p$ , кВ; средний размер частиц  $d_{с.р.}$ , мкм. Состав газов близок к атмосферному воздуху.

#### Варианты заданий

№ п/п	$V_0$ , м <sup>3</sup> /ч	$\rho_0$ , кг/м <sup>3</sup>	$t_r$ , °С	$P_{бар}$ , кПа	$P$ , кПа	$U_p$ , кВ	$d_{с.р.}$ , мкм.
1	85 000	1,3	130	101,3	2	70	0,9
2	50 000	1,1	220	100	5	80	0,5
3	70 000	1,25	150	99,8	2,5	80	0,05
4	80 000	1,15	200	100,2	3	70	0,6
5	60 000	1,1	180	101,3	4	90	0,01
6	90 000	1,05	280	98,5	1	70	0,02
7	85 000	1,1	240	100	2	80	0,8
8	70 000	1,0	300	99,1	1,5	100	0,3
9	90 000	1,35	110	101,5	3	70	0,9

#### Методические указания к расчету электрофильтра:

1. Определяем плотность газа при рабочих условиях:

$$\rho_z = \rho_0 \cdot \frac{273 \cdot (P_{бар} - P_u)}{(273 + t_z) \cdot P_{бар}}, \text{ кг/м}^3$$

2. Расход газа при рабочих условиях:

$$V_r = \frac{V_0 \rho_0}{\rho_r \cdot 3600}, \text{ м}^3/\text{с}$$

3. По данным практики, принимаем скорость потока газов в электрофильтре  $v_r = 0,8$  м/с, тогда необходимая площадь поперечного сечения электрофильтра:

$$F = \frac{V_r}{v_r}, \text{ м}^2$$

4. По таблице 1 выбираем тип электрофильтра, принимаемого к установке.

5. Фактическая скорость потока газов в электрофилт্রে:

$$v_d = \frac{V_r}{F_\phi}, \text{ м/с}$$

где  $F_\phi$  – площадь активного сечения принятого фильтра (см. табл. 1).

6. Относительная плотность газов при стандартных условиях ( $P_{ст} = 101,3 \text{ кПа}$ ;  $T_{ст} = 20^\circ\text{C}$ ):

$$\rho_{отн} = \frac{(P_{бар} - P)(273 + T_{ст})}{P_{ст}(273 + T)}, \text{ кг/м}^3$$

7. Критическая напряженность электрического поля:

$$E_{кр} = 3,04 \left( \rho_{отн} + 0,0311 \sqrt{\frac{\rho_{отн}}{R_1}} \right) 10^6, \text{ В/м}$$

где  $R_1$  – радиус коронирующего электрода  $R_1 = 0,001 \text{ м}$ .

8. Средняя напряженность электрического поля:

$$E_{cp} = \frac{U_p}{d}, \text{ В/м}$$

где  $d = 13,7 \text{ см}$  – расстояние между плоскостями осадительных и коронирующих электродов.

9. Скорость дрейфа  $v_d$  для частиц мельче  $1 \text{ мкм}$ :

$$v_d = \frac{0,17 \cdot 10^{-11} E_{cp}}{\mu}, \text{ м/с}$$

где  $\mu$  – динамическая вязкость газов при данной температуре,  $\mu = 23,1 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}$ .

Таблица 1 Технические характеристики электрофильтров

Типоразмер	Площадь активного сечения, $\text{м}^2$	Число секций	Число полей	Шаг между одноименными электродами, $\text{мм}$	Активная длина поля, $\text{м}$	Общая площадь осаждения, $\text{м}^2$
УГ1-3-10	10	—	3	—	2,51	630
УГ1-3-15	15	—	3	—	2,51	940
УГ2-3-26	26	—	3	—	2,51	1690
УГ2-3-37	37	—	3	—	2,51	2360
УГ2-3-53	53	—	3	—	2,51	3370
УГ2/2-74	74	—	3	—	2,51	4700
УГ-3-88	88	—	3	—	3,95	9200
УГ3-3-115	115	—	3	—	3,95	12100

УГ3-4-115	115	—	4	—	3,95	16100
УГ3-3-177	177	—	3	—	3,95	18400
УГ3-4-177	177	—	4	—	3,95	24600
УГ3-3-230	230	—	3	—	3,95	24200
УГ3-4-230	230	—	4	—	3,95	32200
УГ3-3-265	265	—	3	—	3,95	27600
УГ3-4-265	265	—	4	—	3,95	36900
УВ-2x10	21	2	1	275	7,4	1200
УВ-3x10	32	3	1	275	7,4	1800
УВ-1x16	16	1	1	275	7,4	900
УВ-2x16	32	2	1	275	7,4	1800
УВ-2x24	48	2	1	275	7,4	2600
УВВВ-8	8	1	1	350	6,2	285
УВВВ-12	12	1	1	350	6,2	430
УВВ-16	16	1	1	350	6,2	570
УВВ-2x12	24	2	1	350	6,2	870

10. Удельная площадь осаждения электрофильтра:

$$f = \frac{F_{\text{ос}}}{V_{\text{r}}}, \text{ м}^2 \cdot \text{с} / \text{м}^3$$

где  $F_{\text{ос}}$  – площадь поверхности осаждения принятого фильтра (см. табл. 1).

11. Коэффициент полезного действия фильтра:

$$\eta = 1 - e^{-v_{\text{др}} \cdot f}$$

Практика показала, что практическая скорость дрейфа может существенно отличаться от расчетной, поэтому КПД электрофильтра обычно ниже расчетного.

### 1.38 РАСЧЕТ СКРУББЕРА ВЕНТУРИ

**Задание:** Рассчитать скруббер Вентури для очистки мартеновского газа.

**Исходные данные:** влагосодержание газа  $f_1$ , г/м<sup>3</sup>; количество газа  $V_0$ , м<sup>3</sup>/ч; температура газа, поступающего в газоочистку  $t$ , °С; запыленность газа  $q_1$ , г/м<sup>3</sup>; разрежение перед трубами Вентури  $p$ , Па; барометрического давления  $p_{\text{бар}} = 101\,325$  Па; требуемая конечная запыленность газа  $q_2$ , мг/м<sup>3</sup>; температура воды, подаваемой в аппараты  $t_1$ , °С. Состав газа: 20% CO<sub>2</sub>, 70% N<sub>2</sub> и 10% O<sub>2</sub>.

#### Варианты заданий

№ п/п	$f_1$ , г/м <sup>3</sup>	$V_0$ , м <sup>3</sup> /ч	$t$ , °С	$q_1$ , г/м <sup>3</sup>	$p$ , Па	$q_2$ , мг/м <sup>3</sup>	$t_1$ , °С
1	50	80 000	250	4	3 000	90	30
2	40	75 000	200	5	2 000	100	25
3	50	60 000	300	6	2 500	110	20
4	60	80 000	150	4	2 750	80	35
5	50	70 000	200	7	2 200	95	30
6	40	65 000	250	5	3 000	100	20
7	60	80 000	300	6	2 500	85	25
8	50	75 000	150	4	2 300	90	22
9	40	60 000	200	7	2 800	110	30

#### Методические указания к расчету скруббера Вентури:

1. Требуемая эффективность пылеуловителя:

$$\eta = \frac{(q_1 - q_2)}{q_1}$$

2. Число единиц переноса<sup>15</sup>:

$$N_q = \ln \left[ \frac{1}{(1 - \eta)} \right]$$

<sup>15</sup> Величина  $\eta$  недостаточно характеризует качество очистки в интервале высоких степеней очистки (0,98–0,99), поэтому используют понятие единиц переноса, аналогично применяемому в технологических процессах, связанных с тепло- и массообменом.

3. Значение удельной энергии  $K_T^{16}$  (кДж/1000 м<sup>3</sup>) находим из формулы:

$$N_q = A \cdot K_m^B$$

Значения А и В принимаются по данным табл. 1.

4. Количество газа, поступающего в трубы Вентури при рабочих условиях:

$$V_1 = V_0 \cdot \frac{101325 \cdot (273 + t)}{3600 \cdot 273 (101325 - P)}, \text{ м}^3/\text{с}$$

5. Общий расход воды на трубы Вентури:

$$V_B = m \cdot V_1, \text{ м}^3/\text{с},$$

где удельный расход воды  $m$  равен 1л/м<sup>3</sup>.

Таблица 1. Значения параметров А и В пыли для некоторых технологических процессов черной металлургии

Вид пыли	А	В
Конверторная пыль	$9,88 \cdot 10^{-2}$	0,4663
Пыль мартеновских печей	$1,565 \cdot 10^{-6}$	1,619
Пыль из доменных печей	0,1925	0,3255
Пыль закрытой печи, выплавляющей углеродистый феррохром	$6,49 \cdot 10^{-5}$	1,1
Зола дымовых газов ТЭЦ	0,17	0,3

6. Гидравлическое сопротивление скруббера Вентури:

$$\Delta p = K_T - p_B \cdot m,$$

где давление воды  $p_B$  равно 300 Па.

7. Плотность газа при нормальных условиях на входе в трубу Вентури:

$$\rho_0 = 1/100 \cdot (\rho_{01} \cdot a_1 + \rho_{02} \cdot a_2 + \dots + \rho_{0n} \cdot a_n), \text{ кг/м}^3,$$

где  $a_1, a_2, \dots, a_n$  – содержание компонента газа в смеси, %(объем);  $\rho_{01}, \rho_{02}, \dots, \rho_{0n}$  – плотности компонентов газа при нормальных условиях, значения которых приведены в табл. 2.

<sup>16</sup> Величина  $K_T$  учитывает способ ввода жидкости в аппарат, диаметр капель, вязкость, поверхностное натяжение и другие свойства жидкости.

Таблица 2

Газ	Плотность при 0°С и давлении 0,101 МПа, кг/м <sup>3</sup>
Азот N <sub>2</sub>	1,2507
Углекислый газ CO <sub>2</sub>	1,963
Кислород O <sub>2</sub>	1,42895

8. Температура газа на выходе из трубы Вентури:

$$t = (0,133 - 0,041 \cdot m) \cdot t_1 + 35, \text{ } ^\circ\text{C}$$

где  $m$  – удельный расход воды, равный 1л/м<sup>3</sup>.

9. Находим влагосодержание газа на выходе из труб Вентури, пользуясь диаграммой I – x (см. рис.):

$$x_1 = f_1 / \rho_0$$

Из точки на диаграмме I – x, характеризуемой параметрами  $x_1$  и  $t_1$ , проводим линию I до пересечения с изотермой  $t_2$  и, опустив перпендикуляр из полученной точки, найдем  $x_2$ , кг/кг или  $f_2 = x_2 \cdot \rho_0$ , кг/м<sup>3</sup>.

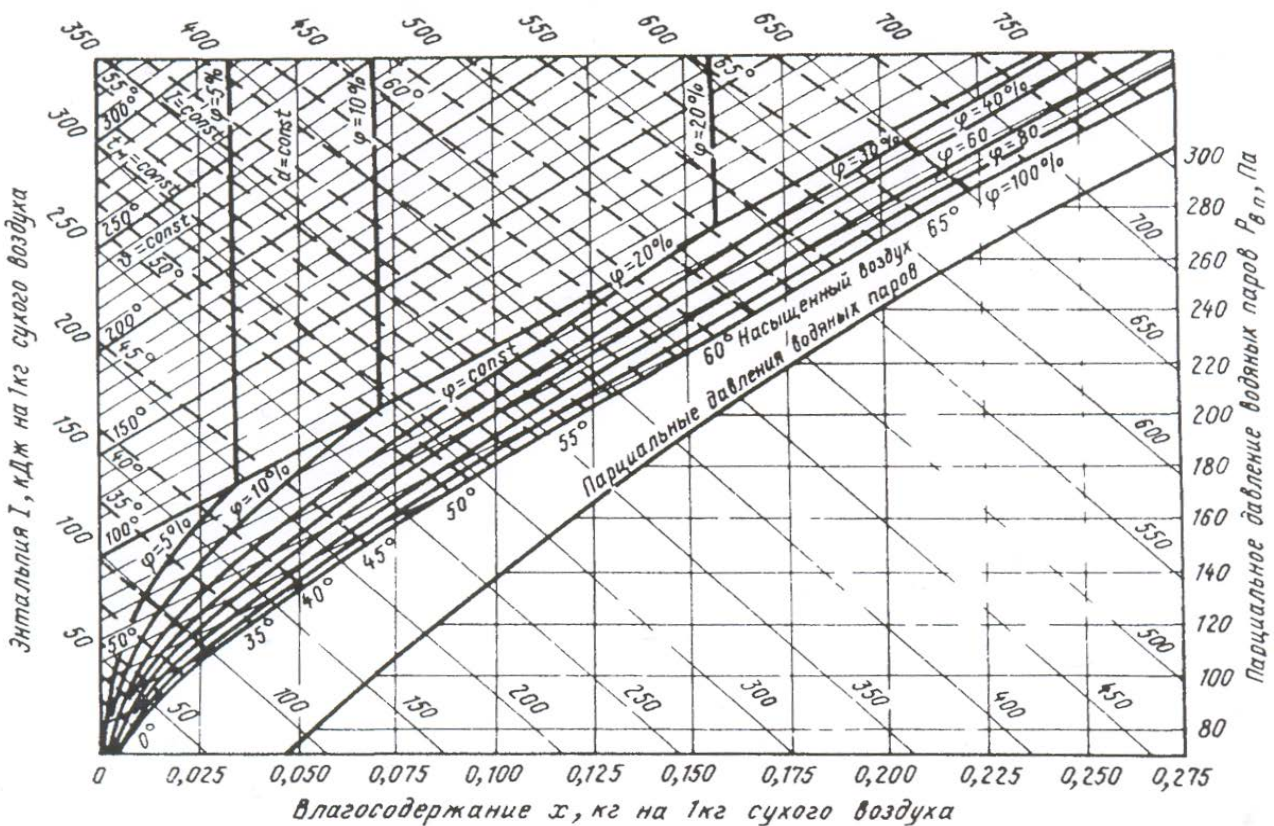


Рисунок 1 – I-x диаграмма влажного воздуха



10. Плотность газа при рабочих условиях на выходе из скруббера Вентури:

$$\rho_2 = \frac{(\rho_0 + f_2) \cdot 273 \cdot (p_{бар} - p - \Delta p)}{(1 + f_2 / 0,804) \cdot 101325 \cdot (273 + t_2)}, \text{ кг/м}^3$$

11. Находим количество газа на выходе из трубы Вентури:

$$V_2 = (V_0 / 3600) \cdot (\rho_0 / \rho_2), \text{ м}^3/\text{с}$$

12. Размеры инерционного пыле- и каплеуловителя (бункера):

$$D_6 = 1,13 \cdot \sqrt{\frac{V_2}{v_6}}, \text{ м,}$$

скорость в поперечном сечении бункера  $v_6$  равна 2,5 м/с.

13. Высоту цилиндрической части бункера принимаем  $H_6 = 4,3$  м.

14. Гидравлическое сопротивление бункера:

$$\Delta p_6 = \xi \cdot (v_6^2 / 2) \cdot \rho_2, \text{ Па,}$$

$\xi$  принимаем равным 80.

15. Выбираем для установки скоростной золоуловитель типа МС-ВТИ (табл. 3) и находим его диаметр:

$$D_{скр} = 1,13 \cdot \sqrt{\frac{V_2}{v_2}}, \text{ м,}$$

скорость газа в цилиндрической части скруббера принимаем  $v_2 = 4,5$  м/с.

Таблица 3 Технические характеристики скоростных золоуловителей типа МС-ВТИ

Типоразмеры	Диаметр аппарата, м	Полная высота корпуса, м	Длина трубы распылителя, м	Номинальная производительность, тыс. м <sup>3</sup> /ч	Расход воды на орошение корпуса, т/ч	Масса аппарата, т
МС-ВТИ-2800	2,8	9,66	2,95	90	4,4	7
МС-ВТИ-3000	3,0	10,32	3,27	108	4,7	8
МС-ВТИ-3200	3,2	10,98	3,51	125	5,0	9,1
МС-ВТИ-3600	3,6	12,29	3,74	160	5,7	11,5
МС-ВТИ-4000	4,0	13,61	4,13	200	6,3	14,2
МС-ВТИ-4500	4,5	15,25	4,69	250	7,0	18,0

16. Предусматриваем стандартный скруббер (табл. 3) и рассчитываем действительную скорость газа в нем:

$$v = 4V_2 / \pi D_{скр}^2, \text{ м/с}$$

17. Гидравлическое сопротивление скруббера:

$$\Delta p_{скр} = \xi \cdot (v^2 / 2) \cdot \rho_2, \text{ Па,}$$

$\xi$  принимаем равным 34.

18. Гидравлическое сопротивление труб Вентури:

$$\Delta p_{ТВ} = \Delta p - \Delta p_{\delta} - \Delta p_{скр}, \text{ Па.}$$

### 1.39 РАСЧЕТ ТКАНЕВОГО РУКАВНОГО ФИЛЬТРА С РЕГЕНЕРАЦИЕЙ (ОБРАТНОЙ ПРОДУВКОЙ)

**Задание:** Рассчитать рукавный фильтр из лавсана, предназначенный для очистки дымовых газов, полное гидравлическое сопротивление фильтра, продолжительность работы фильтра между двумя регенерациями, площадь фильтрования.

**Исходные данные:** расход газа при нормальных условиях  $V_0$ , м<sup>3</sup>/ч; плотность газа при нормальных условиях  $\rho_0$ , кг/м<sup>3</sup> (плотность воздуха при нормальных условиях равна 1,29 кг/м<sup>3</sup>); динамический коэффициент вязкости при нормальных условиях  $\mu_0$ , Па·с ( $\mu_0 = 2 \cdot 10^{-9}$  Па·с); температура газа перед входом в фильтр  $t_r$ , °С; разрежение перед входом в фильтр  $P_r$ , Па; гидравлическое сопротивление фильтра  $\Delta p$ , Па; плотность частиц пыли  $\rho_{ч}$ , кг/м<sup>3</sup>; характеристика дисперсного состава пыли: концентрация пыли в газе перед фильтром  $z_0$ , г/м<sup>3</sup>; средний размер частиц (дисперсность пыли)  $d_m$ , мкм.

Принимаем допустимую температуру газа для лавсана  $t_r = 130^\circ\text{C}$ , температуру воздуха  $t_b = 30^\circ\text{C}$ .

Варианты заданий

№ п/п	$V_0 \cdot 10^{-3}$ , м <sup>3</sup> /ч	$t_r$ , °С	$P_r$ , Па	$\Delta p$ , кПа	$Z_0$ , г/м <sup>3</sup>	$\rho_{ч}$ , кг/м <sup>3</sup>	$d_m$ , мкм
1	125	140	300	1,4	50	3000	10
2	150	250	2500	0,5	20	1500	15
3	75	150	1000	1,0	30	2000	7,5
4	100	200	500	1,5	25	2500	12
5	90	180	2000	0,7	15	1800	17
6	70	280	800	1,2	35	2800	18
7	110	240	2200	0,8	25	2000	13
8	130	300	1000	0,8	10	3500	20
9	105	240	2300	0,9	27	2300	14

#### Методические указания к расчету фильтра:

1. Определяем подсос воздуха перед фильтром:

$$V_{0B} = V_0 \cdot \frac{t_r - t_r}{t_r - t_b}, \text{ м}^3/\text{ч}$$

2. Полный расход газа, идущего на фильтрование, при нормальных условиях:

$$V_{0Г} = V_0 + V_{0B}, \text{ м}^3/\text{ч}$$

3. Расход газа, идущего на фильтрование, при рабочих условиях:

$$V_{\Gamma} = V_{0\Gamma} \cdot \frac{(273 + t_{\Gamma}) \cdot P_{\text{бар}}}{273 \cdot (P_{\text{бар}} - P_{\Gamma})}, \text{ м}^3/\text{ч}$$

4. Запыленность газа перед фильтром при рабочих условиях:

$$Z = \frac{Z_0 \cdot V_0}{V_{\Gamma}}, \text{ г/м}^3$$

5. Допустимая газовая нагрузка на фильтр в данных условиях:

$$q_{\phi} = q_n \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot C_4 \cdot C_5, \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{мин})$$

6. Скорость фильтрации:

$$\omega_{\phi} = q_{\phi} / 60, \text{ м/с}$$

где  $q_n$  – нормативная удельная нагрузка, зависящая от вида пыли и ее склонности к агломерации,  $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{мин})$ ;  $q_n = 1,2$  – пары металлов;  $1,7$  – кокс, летучая зола;  $2,0$  – цемент, уголь, известняк;  $C_1$  – коэффициент, учитывающий скорость регенерации (при регенерации обратной продувкой с встряхиванием  $C_1 = 0,7$ );

$C_2$  – коэффициент, учитывающий начальную запыленность газа (определяют по рис.);  $C_3$  – коэффициент, учитывающий дисперсность пыли;

$C_4$  – коэффициент, учитывающий влияние температуры газа;

$C_5$  – коэффициент, учитывающий требования к качеству очистки.

Коэффициенты  $C_3$  и  $C_4$  выбираются из таблиц 1 и 2.

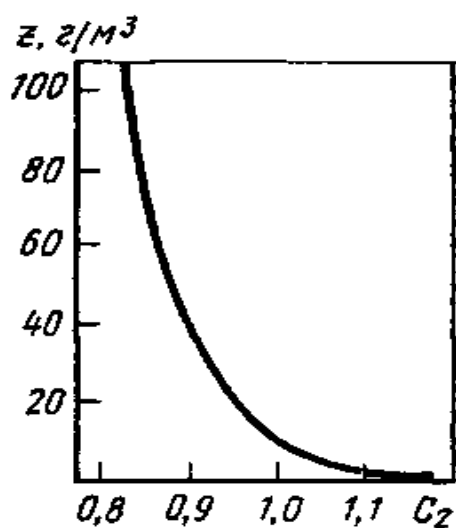


Рис. Зависимость коэффициента  $C_2$  от концентрации пыли.

Таблица 1

$d_m, \text{ мкм}$	> 100	50–100	10–50	3–10	< 3
$C_3$	1,2–1,4	1,1	1,0	0,9	0,7–0,9

Таблица 2

$t_r, \text{ °C}$	20	40	60	80	100	120	140	160
$C_4$	1,0	0,9	0,84	0,78	0,75	0,73	0,72	0,7

Коэффициент  $C_5$  находится из условий: при  $z_0 > 30$  мг/м<sup>3</sup>,  $C_5 = 1$ ; при  $z_0 < 30$  мг/м<sup>3</sup>,  $C_5 = 0,95$ .

7. Плотность газа при рабочих условиях:

$$\rho_r = \rho_0 \cdot \frac{273 \cdot (P_{\text{бар}} - P_r)}{(273 + t_r) \cdot P_{\text{бар}}}, \text{ кг/м}^3$$

8. Динамический коэффициент вязкости при рабочих условиях:

$$\mu = \mu_0 \cdot 273/t_r \cdot (t_r/273)^{1,5}, \text{ Па} \cdot \text{с}$$

9. Полное гидравлическое сопротивление фильтра  $\Delta p$ :

$$\Delta p = \Delta p_{\text{ф}} + \Delta p_{\text{к}}, \text{ Па}$$

где  $\Delta p_{\text{к}}$  – сопротивление корпуса аппарата, Па:

$$\Delta p_{\text{к}} = \frac{\zeta \omega_{\text{вх}}^2 \rho_2}{2}, \text{ Па}$$

$\zeta$  – коэффициент сопротивления, который задается в пределах 1,5–2,5;

$\omega_{\text{вх}}$  – скорость газа при входе в фильтр, принимается в пределах 5–15 м/с;

$\Delta p_{\text{ф}}$  – сопротивление фильтровальной перегородки, Па.

Гидравлическое сопротивление фильтровальной перегородки складывается из:  
 $\Delta p_{\text{ф}} = \Delta p - \Delta p_{\text{к}}, \text{ Па}$

10. Продолжительность периода фильтрования между двумя регенерациями:

$$\tau_{\text{ф}} = \frac{(\Delta p_{\text{ф}} / \mu \cdot \omega_{\text{ф}}) - A}{B \cdot \omega_{\text{ф}} \cdot Z}, \text{ с}$$

Коэффициенты А и В для пыли (ткань–лавсан) выбираются из табл. 3.

Таблица 3

$d_m, \text{ мкм}$	$A, \text{ м}^{-1}$	$B, \text{ м/кг}$
10–20	$(1100–1500) \cdot 10^6$	$(6,5–16) \cdot 10^9$
2,5–3	$(2300–2400) \cdot 10^6$	$80 \cdot 10^9$

11. Количество регенераций в течении часа:

$$n_p = 3600 / (\tau_{\text{ф}} + \tau_{\text{рег}})$$

где  $\tau_{\text{рег}}$  задается в пределах 40–60 с.

12. Расход воздуха на регенерацию, принимая, что скорость обратной продувки равна скорости фильтрования:

$$V_{\text{рег}} = V_{\Gamma} \cdot n_{\text{P}} \cdot \tau_{\text{рег}} / 3600 \text{ , м}^3/\text{ч}$$

13. Предварительно определяем необходимую фильтровальную площадь:

$$F_{\phi} = (V_{\text{рег}} + V_{\Gamma}) / 60 \cdot q_{\phi} \text{ , м}^2$$

Выбираем для установки фильтр марки ФРО из табл. 4 с поверхностью фильтрования  $F_{\phi}$ , состоящий из  $N_c$  секций.

Таблица 4

Характеристика	ФРО-1250-1	ФРО-1650-1	ФРО-2500-1	ФРО-4100-1	ФРО-5100-2	ФРО-6000-2	ФРО-7000-2	ФРО-8000-2
Фильтрующая поверхность $F_{\phi}$ , м <sup>2</sup>	1266	1688	2530	4104	5130	6156	7182	8208
Количество рукавов	252	336	504	432	540	648	756	864
Количество секций	6	8	12	8	10	12	14	16
Высота рукава, м	8	8	8	10	10	10	10	10
Диаметр рукава, мм	200	200	200	300	300	300	300	300
Габаритные размеры: длина, L ширина, B высота, H	5,1 6,84 13,77	6,6 6,84 13,77	9,6 6,84 13,77	12,6 9,84 16,2	15,6 9,84 16,2	18,6 9,84 16,2	21,6 9,84 16,2	24,6 9,84 16,2
Масса, т	37,8	50,4	75,6	108,5	136	162,8	190	217

14. Площадь фильтрования  $F_p$ , отключаемая на регенерацию в течение 1 часа:

$$F_p = F_{\phi} \cdot n_{\text{P}} \cdot \tau_{\text{рег}} / 3600 \text{ , м}^2$$

15. Уточненное количество воздуха, расходуемое на обратную продувку в течение 1 часа:

$$V_{\text{рег}} = F_{\phi} \cdot n_{\text{P}} \cdot \tau_{\text{рег}} \cdot \omega_{\phi} \text{ , м}^3/\text{ч}$$

16. Окончательная площадь фильтрования равна:

$$F'_{\phi} = (V_{\text{рег}} + V_{\Gamma}) / 60 \cdot q_{\phi} + F_p$$

## 1.40 РАСЧЕТ ПЕСКОЛОВКИ–ЖИРОЛОВКИ

**Задание:** Определить расчетный расход сточных вод и геометрические размеры песколовки-жировки для очистки сточных вод предприятия.

**Исходные данные:** производственная мощность **П**, т/смену; норма водоотведения на единицу продукции **m**, м<sup>3</sup>; часовой коэффициент **K<sub>ч</sub>**; скорость движения воды **V**, м/с; средний диаметр частиц **d**, мкм; число рабочих часов в смену **t**, ч; рабочая глубина нефтеловушки **H**, м.

### Варианты заданий

№ п/п	П, т/смену	m, м <sup>3</sup>	K <sub>ч</sub>	t, ч	H, м	V, м/с;	d, мкм;
1	25	20,2	2,5	8	1,5	0,0030	100
2	30	24,8	2,0	8	1,5	0,0035	100
3	20	15,6	2,5	8	2,0	0,0032	95
4	25	25,4	2,0	7	2,0	0,0033	95
5	30	22,6	2,0	8	2,5	0,0030	90
6	35	18,6	2,2	7	3,0	0,0030	90
7	40	16,5	2,2	8	3,0	0,0025	85
8	18	16,8	2,5	7	2,5	0,0023	85
9	24	16,5	2,0	7	2,5	0,0022	80

### Методические указания к расчету песколовки-жировки:

1. Скорость осаждения примесей:

$$U = \frac{d^2 \cdot (\rho_{ж} - \rho_{нп}) \cdot g}{18 \cdot \mu_{ж}}, \text{ м/с}$$

где  $\rho_{ж}$  и  $\rho_{нп}$  – плотность воды и нефтепродуктов соответственно (принимают  $\rho_{ж} = 1000 \text{ кг/м}^3$ ,  $\rho_{нп} = 800 \text{ кг/м}^3$ );  $\mu_{ж}$  – коэффициент динамической вязкости среды ( $0,5 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$ ).

2. Длина нефтеловушки:

$$L = \frac{V \cdot H}{K \cdot (U - W)}, \text{ м}$$

где  $K$  – поправочный коэффициент, учитывающий вихревые и струйные образования вследствие конструктивных особенностей (для горизонтальных отстойников принимают  $K = 0,5$ );  $W$  – вертикальная составляющая скорости движения воды в нефтеловушке, м/с (принимают  $W = 0,5V$ ).

3. Максимальный часовой расход сточных вод:

$$Q = \frac{m \cdot \Pi \cdot K_q}{T}, \text{ м}^3/\text{ч}$$

4. Рабочая ширина нефтеловушки:

$$B = Q / \sqrt{H} \cdot 3600, \text{ м}$$



## 1.41 РАСЧЕТ ВЫБРОСА ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ ПРИ СЖИГАНИИ ТОПЛИВА В КОТЛОАГРЕГАТАХ КОТЕЛЬНОЙ

Для котлоагрегатов и парогенераторов производительностью до 30 т/ч и выше 30 т/ч существуют различные методики расчета загрязняющих веществ.

Настоящая методика предназначена для расчета выбросов загрязняющих веществ в атмосферу с газообразными продуктами сгорания при сжигании твердого топлива, мазута и газа в топках промышленных и коммунальных котлоагрегатов и теплогенераторов производительностью до 30 т/ч.

При *сжигании твердого топлива* наряду с основными продуктами сгорания ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ) в атмосферу поступают твердые частицы (летучая зола с частицами несгоревшего топлива), оксиды серы, углерода и азота.

При *сжигании мазутов* с дымовыми газами выбрасываются оксиды углерода, серы, азота и мазутная зола (в пересчете на соединения ванадия).

При *сжигании газа* с дымовыми газами выбрасываются диоксид азота, оксид углерода.

Выбросы загрязняющих веществ зависят как от количества и вида топлива, так и от типа котлоагрегата.

### Валовый выброс твердых частиц в дымовых газах, т/год

$$M_T = A \cdot m \cdot \chi \cdot (1 - \eta_T/100),$$

где  $A$  - зольность топлива, в % (табл. 1.);

$m$  - количество израсходованного топлива в год, т;

$\chi$  - безразмерный коэффициент, характеризующий долю уносимой с дымовыми газами летучей золы, зависит от типа топки и топлива (табл. 2.);

$\eta_T$  - эффективность золоуловителей, % (табл. 3.).

### Валовый выброс мазутной золы в пересчете на ванадий, т/год

$$M_v = 10^{-6} \cdot q_v \cdot m \cdot (1 - n_{oc}) \cdot (1 - n_y),$$

где  $q_v$  - содержание оксидов ванадия в мазуте, г/т;

$m$  - количество израсходованного топлива в год, т;

$n_{oc}$ ,  $n_y$  - коэффициенты оседания и улавливания оксидов ванадия ( $n_{oc}=0$ ,  $n_y=0$ ).

Содержание ванадия в мазуте (г/т) определяется в зависимости от зольности мазута по формуле:  $q_v = 4000 \cdot A / 1,8$

### Валовый выброс оксида углерода, т/год

$$M_{CO} = C_{CO} \cdot m \cdot (1 - q_4/100) \cdot 10^{-3},$$

где  $q_4$  - потери теплоты вследствие механической неполноты сгорания, % (табл. 4.);

$m$  - количество израсходованного топлива, т/год, (тыс.м<sup>3</sup>/год);

$C_{CO}$  - выход оксида углерода при сжигании топлива, кг/т, (кг/тыс.м<sup>3</sup>);

$$C_{CO} = q_3 \cdot R \cdot Q^H,$$

где  $q_3$  - потери теплоты вследствие химической неполноты сгорания топлива, % (табл. 4.);

$R$  - коэффициент, учитывающий долю потери теплоты вследствие химической неполноты сгорания топлива, обусловленный наличием в продуктах сгорания оксида углерода,

$R = 1$  - для твердого топлива,

$R = 0,5$  - для газа,

$R = 0,65$  - для мазута;

$Q^H$  - низшая теплота сгорания натурального топлива (табл. 1.), МДж/кг, МДж/м<sup>3</sup>.

### Валовый выброс оксидов азота в пересчете на диоксид азота, т/год

$$M_{NO_2} = m \cdot Q^H \cdot K_{NO_2} \cdot (1 - \beta) \cdot 10^{-3},$$

где  $K_{NO_2}$  - параметр, характеризующий количество оксидов азота, образующихся на один ГДж тепла, кг/ГДж (табл. 5.);

$\beta$  - коэффициент, зависящий от степени снижения выбросов оксидов азота в результате применения технических решений. Для котлов производительностью до 30 т/час  $\beta = 0$ .

### Валовый выброс оксидов серы в пересчете на диоксид серы, т/год (определяется только для твердого и жидкого топлива)

$$M_{SO_2} = 0,02 \cdot m \cdot S \cdot (1 - \eta'_{SO_2}) \cdot (1 - \eta''_{SO_2}),$$

где  $S$  - содержание серы в топливе, %, табл. 1.;

$\eta'_{SO_2}$  - доля оксидов серы, связываемых летучей золой топлива. Для эстонских и ленинградских сланцев принимается равной 0,8; остальных сланцев - 0,5; углей Канско-Ачинского бассейна - 0,2 (Березовских - 0,5); торфа - 0,15; экибастузских - 0,02; прочих углей - 0,1; мазута - 0,02; газа - 0.

$\eta''_{\text{SO}_2}$  - доля оксидов серы, улавливаемых в золоуловителе. Для сухих золоуловителей принимается равной 0.

Расчет предельно-допустимых выбросов загрязняющих веществ (ПДВ) проводится для случая максимального расхода топлива. В общем случае **максимальный расход топлива** (г/с, л/с) определяется по формуле:

$$m = \Pi \cdot 10^6 / Q^h \cdot \text{КПД} \cdot 3,6$$

где  $\Pi$  – суммарная теплопроизводительность котлов, Гкал/час,

$Q^h$  – низшая теплота сгорания топлива, Ккал/кг, Ккал/м<sup>3</sup>,

КПД – коэффициент полезного действия котлоагрегата.

Для установок, где максимальный расход топлива значительно превышает значение среднегодового расхода (например, для отопительных котельных) за  $m'$  принимается расход топлива в самый напряженный месяц (например, январь для отопительных котлов).

Тогда максимально разовый выброс (г/с) определяется по следующим формулам:

Максимально разовый выброс твердых частиц в дымовых газах, г/с

$$G_T = A \cdot m \cdot \chi \cdot (1 - \eta_T/100),$$

Максимально разовый выброс мазутной золы в пересчете на ванадий, г/с

$$G_v = 10^{-6} \cdot q_v \cdot m \cdot (1 - n_{oc}) \cdot (1 - n_y),$$

Максимально разовый выброс оксида углерода, г/с

$$G_{CO} = q_3 \cdot R \cdot Q^h \cdot m \cdot (1 - q_4/100) \cdot 10^{-3},$$

Максимально разовый выброс оксида азота, г/с

$$G_{NO_2} = m \cdot Q^h \cdot K_{NO_2} \cdot (1 - \beta) \cdot 10^{-3},$$

Максимально разовый выброс оксида серы, г/с

$$G_{SO_2} = 0,02 \cdot m \cdot S \cdot (1 - \eta'_{SO_2}) \cdot (1 - \eta''_{SO_2})$$

Таблица 1 Характеристика топлив (при нормальных условиях)

Наименование топлива	A, %	S, %	$Q^H$ , МДж/кг; МДж/м <sup>3</sup>
<b>Угли</b>			
Донецкий бассейн, марки угля (к):			
ДР	28,0	3,5	18,50
Д концентрат	10,0	3,0	23,74
ГР	28,0	3,5	20,47
Подмосковный бассейн (б):			
Б2Р, Б20МСШ	39,0	4,2	9,88
Челябинский бассейн (к):			
Б3	29,9	1,0	14,19
Канско-Ачинский бассейн (б):			
БР2 (Ирша-Бородинский разрез)	6,7	0,2	15,54
БР2 (Назаровский разрез)	7,3	0,4	13,06
Б2 (Березовское месторождение)	4,7	0,2	15,70
Б1 (Итатское месторождение)	6,8	0,4	12,85
Б1 (Боготольское месторождение)	6,7	0,5	11,84
Иркутский бассейн (к):			
БР (Черемховское месторождение)	27,0	1,0	17,93
ДР (Забитуйское месторождение)	23,0	4,1	20,91
Б3Р (Тулунский разрез)	12,6	0,4	16,38
Сахалинский бассейн (к):			
Б3Р, Б3 концентрат	22,0	0,4	17,33
ГСШ (Углегорский район)	20,0	0,3	22,86
Б3Р (шахта Шебунино)	16,0	0,4	18,17
Б3Р концентрат (ш.Горнозаводская)	12,0	0,5	18,92
Южноуральский бассейн	6,6	0,7	9,11
Партизанский бассейн	34,0	0,5	20,81
Кузнецкий бассейн (к):			
БР, ДСШ	13,2	0,4	22,93
ГР, 1М, ГСШ	14,3	0,5	25,32

Наименование топлива	A, %	S, %	$Q^H$ , МДж/кг; МДж/м <sup>3</sup>
Г (промпродукт)	23,8	0,5	20,07
ССР	14,1	0,6	27,51
ОС (промпродукт)	27,9	0,8	21,84
ОС2ССМ	18,2	0,4	24,78
ТОМСШ	18,6	0,6	25,20
СС1ССМ	18,2	0,3	23,64
<b>Горючий сланец</b>			
Эстонсланец	50,5	1,6	11,34
Ленинградсланец	54,2	1,5	11,34
<b>Торф</b>			
Росторф	12,5	0,3	8,12
<b>Другие виды топлива</b>			
Дрова	0,6	-	10,24
Мазут малосернистый	0,1	0,5	40,30
Мазут сернистый	0,1	1,9	39,85
Мазут высокосернистый	0,1	4,1	38,89
Дизельное топливо	0,025	0,3	42,75
Солярное масло	0,02	0,3	42,46
<b>Природный газ из газопроводов</b>			
Саратов-Москва	-	-	35,80
Саратов-Горький	-	-	36,13
Брянск-Москва	-	-	37,30
Уренгой-Помары-Ужгород	-	-	41,75

Таблица 2 Значения коэффициента  $\chi$  в зависимости от типа топки и топлива

Тип топки	Топливо	$\chi$
С неподвижной решеткой и ручным забросом	Бурые и каменные угли	0,0023
	Антрацит АС и АМ	0,0030
	Антрацит АРМ	0,0078
С забрасывателями и цепной решеткой	Бурые и каменные угли	0,0035
Шахтная	Твердое топливо	0,0019
Шахтно-цепная	Торф кусковой	0,0019
Камерные топки	Мазут	0,010
	Легкое жидкое топливо	0,010
Слоевые топки бытовых теплоагрегатов	Дрова	0,0050
	Бурые угли	0,0011
	Каменные угли	0,0011
С пневмомеханическими за-	Бурые и каменные угли	0,0026

Тип топки	Топливо	$\chi$
брасывателями и неподвижной решеткой	Антрацит АРШ	0,0088

Таблица 3 Средние эксплуатационные эффективности аппаратов пылеулавливания и газоочистки отходящих газов котельных

Аппарат, установка	Эффективность улавливания, %
Батарейные циклоны типа БЦ-2	85
Батарейные циклоны на базе секции СЭЦ-24	93
Батарейные циклоны типа ЦБР-150У	93-95
Электрофильтры	97-99
Центробежные скрубберы ЦС-БТИ	88-90
Групповые циклоны ЦН-15	85-90
Жалюзийные золоуловители	75-85

Таблица 4 Характеристики топок котлов малой мощности

Тип топки и котла	Топливо	$q_3$	$q_4$
С пневмомеханическими забрасывателями и неподвижной решеткой	Антрацит	0,5-1	13,5-10
	Бурые угли	0,5-1	9-7,5
	Каменные угли	0,5-1	5,5-3
С пневмомеханическими забрасывателями и цепной решеткой	Каменные угли	0,5-1	5,5-3
	Бурые угли	0,5-1	6,5-4,5
Шахтная топка с наклонной решеткой	Дрова	2	2
	Торф кусковой	2	2
	Дробленые отходы	2	2
Камерная топка с твердым шлакоудалением	Каменные угли	0,5	5-3
	Бурые угли	0,5	3-1,5
	Торф	0,5	3-1,5
При неподвижной решетке и ручном забросе топлива	Антрацит	1	10
	Бурые угли	2	8
	Каменные угли	2	7
Камерная топка	Мазут	0,5	0
	Газ	0,5	0

*Примечание:* большие значения  $q_4$  - при отсутствии средств уменьшения уноса, меньшие - при остром дутье и наличии возврата уноса, а также для котлов производительностью 25-35 т/ч.

Таблица 5

Коэффициент  $K_{NO_2}$  для производительностью до 30 т/ч (1 кал = 4,1868 Дж, 1 т/ч = 0,641 Гкал/ч = 743,6 кВт)

Паропроизводительность котлоагрегатов			Значение $K_{NO_2}$			
т/ч	Гкал/ч	кВт	Природный газ, мазут	Антрацит	Бурый уголь	Каменный уголь
0,2	0,13	148,7	0,060	0,092	0,14	0,15
0,25	0,16	185,9	0,065	0,095	0,145	0,155
0,5	0,32	371,8	0,070	0,105	0,15	0,165
0,7	0,45	520,5	0,080	0,11	0,16	0,175
1,0	0,64	743,6	0,085	0,115	0,165	0,18
2,0	1,28	1487	0,090	0,125	0,175	0,2
2,5	1,60	1860	0,095	0,13	0,18	0,21
4,0	2,56	2974	0,098	0,133	0,19	0,215
6,0	3,85	4461	0,100	0,14	0,2	0,22
8,0	5,13	5949	0,102	0,145	0,21	0,23
10,0	6,41	7436	0,103	0,15	0,22	0,235
15,0	9,62	11153	0,105	0,155	0,225	0,245
20,0	12,82	14871	0,109	0,16	0,23	0,25
25,0	16,03	18509	0,110	0,162	0,235	0,255
30,0	19,23	22307	0,115	0,165	0,24	0,26

#### 1.42 ПРИМЕР РАСЧЕТА ВЫБРОСОВ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ В АТМОСФЕРУ ПРИ СЖИГАНИИ ТОПЛИВА В КОТЕЛЬНЫХ

**Задание:** Рассчитать выбросы вредных веществ в атмосферу от отопительной котельной, потребляющей в год 360 т каменного угля Кузбасского бассейна марки ССР (подземный способ добычи).

Теплотехнические характеристики углей:

- низшая теплота сгорания угля  $Q^H = 27,42$  МДж/кг (6550 ккал/кг);
- зольность угля (на рабочую массу)  $A = 14,1$  %;
- содержание серы (на рабочую массу)  $S = 0,6$  %.

Продолжительность отопительного периода 234 дня (5616 часов).

Расход угля в самый холодный месяц года (январь) 62 т.

Паропроизводительность котлоагрегата 0,6 т/ч.

Топка с неподвижной решеткой и ручным забросом.

В атмосферу от котельных при сжигании твердого топлива выбрасываются: **твердые частицы, диоксиды серы и азота, оксид углерода.**

### Расход топлива в январе (г/с):

$$m = 62 \cdot 10^6 / (31 \cdot 24 \cdot 3600) = 23,15 \text{ г/с}$$

### Расчет выбросов твердых частиц в дымовых газах:

$$M_T = A \cdot m \cdot \chi \cdot (1 - \eta_T/100),$$

$$G_T = A \cdot m \cdot \chi \cdot (1 - \eta_T/100).$$

$$M_T = 360 \cdot 14,1 \cdot 0,0023 \cdot (1-0) = 11,67 \text{ т/год},$$

$$G_T = 23,15 \cdot 14,1 \cdot 0,0023 \cdot (1-0) \text{ г/с}.$$

### Расчет выбросов оксидов углерода:

$$M_{CO} = C_{CO} \cdot m \cdot (1 - q_4/100) \cdot 10^{-3},$$

$$G_{CO} = q_3 \cdot R \cdot Q^H \cdot m \cdot (1 - q_4/100) \cdot 10^{-3}.$$

Потери теплоты вследствие механической и химической неполноты сгорания топлива в данном случае равны  $q_4=7\%$ ,  $q_3=2\%$  (табл. 4),  $R = 1$  – для твердого топлива.

$$C_{CO} = q_3 \cdot R \cdot Q^H = 2 \cdot 1 \cdot 27,42 = 54,82 \text{ кг/т},$$

$$M_{CO} = 0,001 \cdot 54,82 \cdot 360 \cdot (1-7/100) = 18,36 \text{ т/год},$$

$$G_{CO} = 0,001 \cdot 54,82 \cdot 23,15 \cdot (1-7/100) = 1,18 \text{ г/с}.$$

### Расчет выбросов оксидов азота:

$$M_{NO_2} = m \cdot Q^H \cdot K_{NO_2} \cdot (1-\beta) \cdot 10^{-3},$$

$$G_{NO_2} = m \cdot Q^H \cdot K_{NO_2} \cdot (1-\beta) \cdot 10^{-3}.$$

$K_{NO_2} = 0,17 \text{ кг/Гдж}$  (табл. 5.);  $\beta = 0$ .

$$M_{NO_2} = 0,001 \cdot 360 \cdot 27,42 \cdot 0,17 \cdot (1-0) = 1,68 \text{ т/год},$$

$$G_{NO_2} = 0,001 \cdot 23,15 \cdot 27,42 \cdot 0,17 \cdot (1-0) = 0,11 \text{ г/с}.$$

### Расчет выбросов оксидов серы:

$$M_{SO_2} = 0,02 \cdot m \cdot S \cdot (1 - \eta'_{SO_2}) \cdot (1 - \eta''_{SO_2}),$$

$$G_{SO_2} = 0,02 \cdot m \cdot S \cdot (1 - \eta'_{SO_2}) \cdot (1 - \eta''_{SO_2}).$$

$\eta'_{SO_2}$  - доля оксидов серы, связываемых летучей золой топлив, для прочих углей равна 0,1.

$\eta''_{SO_2}$  - доля оксидов серы, улавливаемых в золоуловителе, в данном случае равна 0.

$$M_{SO_2} = 0,02 \cdot 360 \cdot 0,6 \cdot (1-0,1) \cdot (1-0) = 3,89 \text{ т/год},$$

$$G_{SO_2} = 0,02 \cdot 0,6 \cdot 23,15 \cdot (1-0,1) \cdot (1-0) = 0,25 \text{ г/с}$$



Результаты расчета представлены в таблице 6.

Таблица 6

Выбросы вредных веществ в атмосферу при сжигании угля в котельной

Количество вредных веществ, выбрасываемых в атмосферу				
Ед. изм.	SO <sub>2</sub>	CO	NO <sub>2</sub>	Твердые вещества
т/год	3,89	18,36	1,68	11,67
г/с	0,25	1,18	0,11	0,75

#### 1.43 РАСЧЕТ РАССЕЙВАНИЯ И НОРМАТИВОВ ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМЫХ ВЫБРОСОВ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ В АТМОСФЕРЕ

Степень опасности загрязнения приземного слоя атмосферного воздуха выбросами вредных веществ от промышленных предприятий (заводов, ТЭС, котельных и т.д.) определяется по наибольшей рассчитанной величине приземной концентрации вредных веществ ( $C_m$ , мг/м<sup>3</sup>).

Величина  $C_m$  определяется на определенном расстоянии от места выброса при наиболее неблагоприятных метеорологических условиях.

Значение  $C_m$  каждого вредного вещества не должно превышать предельно допустимой концентрации данного вредного вещества, т.е. должно соблюдаться условие:  $C_m \leq \text{ПДК}$

При одновременном совместном присутствии в атмосферном воздухе нескольких ( $n$ ) вредных веществ, обладающих суммацией действия, их безразмерная суммарная концентрация  $q$  не должна превышать единицу при расчете:

$$q = \frac{C_1}{\text{ПДК}_1} + \frac{C_2}{\text{ПДК}_2} + \dots + \frac{C_n}{\text{ПДК}_n} \leq 1$$

где  $c_1, c_2, \dots, c_n$  (мг/м<sup>3</sup>) – концентрации вредных веществ в атмосферном воздухе в одной и той же точке местности, мг/м<sup>3</sup>;

$\text{ПДК}_1, \text{ПДК}_2, \dots, \text{ПДК}_n$  (мг/м<sup>3</sup>) – соответствующие максимальные разовые предельно допустимые концентрации вредных веществ в атмосферном воздухе.

*Примечание:* максимально разовые концентрации вредных веществ определяют по пробам, отобраным в течение 20 мин.

#### 1.44 РАСЧЕТ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ ВЫБРОСАМИ ОДИНОЧНОГО ИСТОЧНИКА

Максимальное значение приземной концентрации вредного вещества при выбросе *нагретой* газовой смеси из одиночного точечного источника с круглым устьем достигается при неблагоприятных метеорологических условиях на расстоянии  $x_m$  (м) от источника и определяется по формуле

$$C_m = \frac{AMFmn\eta}{H^2 \sqrt[3]{Vi\Delta t}}$$

Максимальная приземная концентрация вредных веществ для выброса *холодной* газовой смеси из одиночного источника с круглым устьем определяется по формуле:

$$C_m = \frac{AMFn\eta}{H^{4/3}}$$

где  $A$  – коэффициент, зависящий от температурной стратификации атмосферы и определяющий условия вертикального и горизонтального рассеивания вредных веществ в атмосферном воздухе; размерность –  $c^{2/3} \cdot \text{мг} \cdot ^\circ\text{C}^{1/3}/\Gamma$ ;

$M$  – масса вредного вещества, выбрасываемого в атмосферу в единицу времени, г/с;

$F$  – безразмерный коэффициент, учитывающий скорость оседания вредных веществ в атмосферном воздухе;

$m$  и  $n$  – коэффициенты, учитывающие условия выхода газовой смеси из устья источника выброса;

$H$  – высота источника выброса над уровнем земли (для наземных источников при расчетах принимается  $H = 2$  м), м;

$\eta$  – безразмерный коэффициент, учитывающий влияние рельефа местности, в случае ровной или слабопересеченной местности с перепадом высот, не превышающим 50 м на 1 км,  $\eta = 1$ ;

$\Delta t$  – разность между температурой выбрасываемой газовой смеси  $t_2$  и температурой окружающего воздуха  $t_0$ ,  $^\circ\text{C}$ ;

$V_i$  – расход газовой смеси  $\text{м}^3/\text{с}$ , определяемый по формуле:

$$V_i = \frac{\pi D^2}{4} \omega_0$$

где  $D$  – диаметр устья источника выброса, м;

$\omega_0$  – средняя скорость выхода газовой смеси из устья источника выброса, м/с.

Величина  $K$  рассчитывается по формуле:

$$K = \frac{D}{8V_i} = \frac{1}{7,1\sqrt{\omega_0 V_i}}$$

Значение коэффициента  $A$ , соответствующее неблагоприятным метеорологическим условиям, при которых концентрация вредных веществ в атмосферном воздухе максимальна, принимается равным:

а) 250 – для районов Средней Азии южнее  $40^\circ$  с.ш., Бурятии и Читинской области;

б) 200 – для Европейской территории бывшего СССР: для районов России южнее  $50^\circ$  с.ш., для остальных районов Нижнего Поволжья, Кавказа, Молдавии; для Азиатской территории бывшего СССР: для Казахстана, Дальнего Востока и остальной территории Сибири и Средней Азии;

в) 180 – для Европейской территории бывшего СССР и Урала от  $50$  до  $52^\circ$  с.ш. за исключением попадающих в эту зону перечисленных выше районов и Украины;

г) 160 – для Европейской территории бывшего СССР и Урала севернее  $52^\circ$  с.ш. (за исключением Центра ЕТС), а также для Украины (для расположенных на Украине источников высотой менее 200 м в зоне от  $50$  до  $52^\circ$  с.ш. – 180, а южнее  $50^\circ$  с.ш. – 200);

д) 140 – для Московской, Тульской, Рязанской, Владимирской, Калужской, Ивановской областей.

Для других территорий значения коэффициента  $A$  должны приниматься соответствующими значениям коэффициента  $A$  для районов со сходными климатическими условиями турбулентного обмена.

Величина  $M$  – количество вредных веществ, выбрасываемых в атмосферу (г/с), может определяться расчетом в технологической части проекта или приниматься в соответствии с действующими для данного производства или процесса нормативами.

При определении значения  $\Delta t$  ( $^\circ\text{C}$ ) следует принимать температуру окружающего атмосферного воздуха  $t_e$  ( $^\circ\text{C}$ ), равной средней максимальной температуре наружного воздуха наиболее жаркого месяца года, а температуру выбрасываемой в атмосферу газовоздушной смеси  $t_2$  ( $^\circ\text{C}$ ) – по действующим для данного производства технологическим нормативам.

**П р и м е ч а н и я:** 1. Для котельных, работающих по отопительному графику, допускается при расчетах принимать значения  $t_e$ , равными средним температурам наружного воздуха за самый холодный месяц. 2. При отсутствии данных по  $t_e$  они запрашиваются в территориальном управлении Госкомгидромета.

Значение безразмерного коэффициента  $F$  принимается:

а) для газообразных вредных веществ и мелкодисперсных аэрозолей (пыли, зола и т.п.), скорость упорядоченного оседания которых практически равна нулю) – 1;

б) для мелкодисперсных аэрозолей (кроме указанных выше) при среднем эксплуатационном коэффициенте очистки выбросов не менее 90% – 2; от 75 до 90% – 2,5; менее 75% и при отсутствии очистки – 3.

Если выбросы сопровождаются выделениями водяного пара и имеет место его конденсация, а также коагуляция влажных пылевых частиц, то  $F$  принимается равным 3, вне зависимости от эффективности очистки.

Коэффициент  $m$  определяется по формуле:

$$m = \frac{1}{0,67 + 0,1\sqrt{f} + 0,34\sqrt[3]{f}}$$

$$f = 1000 \frac{\omega_0^2 D}{H^2 \Delta t}$$

Выбросы для которых  $f < 100$  относят к *нагретым*, а  $f \geq 100$  – к *холодным*.

Коэффициент  $n$  при  $f < 100$  определяется в зависимости от  $v_m$  (максимальная скорость ветра, м/с) по формулам:

$$\begin{aligned} n &= 1 && \text{при } v_m \geq 2; \\ n &= 0,532 v_m^2 - 2,13 v_m + 3,13 && \text{при } 0,5 \leq v_m < 2 \\ n &= 4,4 v_m && \text{при } v_m < 0,5 \end{aligned}$$

Для холодных выбросов ( $f \geq 100$ )  $n$  определяется также, как и для нагретых выбросов при  $v_m = v'_m$ .

Для *нагретых* выбросов параметр  $v_m$  определяется по формуле:

$$v_m = 0,65 \sqrt[3]{\frac{V_i \Delta t}{H}},$$

а для холодных:

$$v'_m = 1,3 \frac{\omega_0 D}{H}$$

Расстояние  $x_m$  (м) от источника выбросов, на котором приземная концентрация  $c$  (мг/м<sup>3</sup>) при неблагоприятных метеорологических условиях достигает максимального значения  $c_m$  определяется по формуле:

$$x_m = \frac{5 - F}{4} d H$$

где безразмерный коэффициент  $d$  при  $f < 100$  находится по формулам:

$$d = 2,48(1 + 0,28 \sqrt[3]{f_e}) \quad \text{при } v_m \leq 0,5$$

Значение параметра  $f_e$  рассчитывается по формуле:

$$f_e = 800 (v'_m)^3$$

$$d = 4,95 v_m (1 + 0,28 \sqrt[3]{f}) \quad \text{при } v_m \leq 0,5 < v_m \leq 2$$

$$d = 7 \sqrt{v_m} (1 + 0,28 \sqrt[3]{f}) \quad \text{при } v_m > 2$$

При  $f > 100$  или  $\Delta t \approx 0$  значение  $d$  находится по формулам:

$$d = 5,7 \quad \text{при } v'_m \leq 0,5;$$

$$d = 11,4 v_m \quad \text{при } 0,5 < v'_m \leq 2;$$

$$d = 16 \sqrt{v_m} \quad \text{при } v'_m > 2$$

*Предельно допустимый выброс* (ПДВ, г/с) вредного вещества в атмосферу из одиночного источника (трубы), при котором обеспечивается не превышающая ПДК его концентрация в приземном слое воздуха, определяется по формулам:

для нагретых выбросов

$$ПДВ = \frac{(ПДК - C_{\phi}) H^2 \sqrt[3]{V_i \Delta t}}{A F m n \eta}$$

для холодных выбросов

$$ПДВ = \frac{8(ПДК - C_{\phi}) H \sqrt[3]{H V_i}}{A F n \eta D}$$

Требуемая степень очистки от вредного вещества (E, %) рассчитывается:

$$E = \frac{M - ПДВ}{M} 100 \%$$

## 1.45 ПРИМЕР РАСЧЕТА РАССЕЙВАНИЯ И НОРМАТИВОВ ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМЫХ ВЫБРОСОВ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ В АТМОСФЕРУ

**Задача:** Источником выброса на предприятии является паросиловое производство, сжигающее уголь. Выброс дымовых газов с температурой  $T_{\Gamma} = 195^{\circ}\text{C}$  ведется через 1 трубу высотой  $H = 30$  м и диаметром  $D = 1,1$  м со скоростью  $w_0 = 13$  м/с. Рассеивание происходит в атмосферном воздухе, температура которого  $T_{\text{в}} = 23,4^{\circ}\text{C}$ . Количество выбрасываемых в атмосферу вредных веществ  $M$  (г/с):  $M_{\text{CO}} = 13,0$ ,  $M_{\text{NO}_2} = 0,87$ ,  $M_{\text{SO}_2} = 6,0$ ,  $M_{\text{пыли}} = 13,3$ . Коэффициент  $A$  принимается равным 200.

Необходимо:

1) Определить наибольшую ожидаемую концентрацию  $C_{\text{м}}$  (мг/м<sup>3</sup>) вредных веществ: оксида углерода CO, сернистого газа SO<sub>2</sub>, оксидов азота NO<sub>x</sub>, пыли в приземном слое атмосферы при неблагоприятных условиях рассеивания;

2) Рассчитать расстояние  $X_{\text{м}}$  (м) от источника выбросов, на котором приземная концентрация  $C$  (мг/м<sup>3</sup>) при неблагоприятных метеорологических условиях достигает максимального значения  $C_{\text{м}}$ ;

3) Сравнить фактическое содержание вредных веществ в атмосферном воздухе ( $C_{\text{м}} + C_{\text{ф}}$ ) с учетом фоновой концентрации  $C_{\text{ф}}$  с санитарно-гигиеническими нормами (ПДК), если:

$$C_{\text{ф}}^{\text{CO}} = 20\% \text{ от ПДК}^{\text{CO}} \quad \text{ПДК}^{\text{CO}} = 5,0 \text{ мг/м}^3;$$

$$C_{\text{ф}}^{\text{NO}_2} = 20\% \text{ от ПДК}^{\text{NO}_2} \quad \text{ПДК}^{\text{NO}_2} = 0,25 \text{ мг/м}^3;$$

$$C_{\text{ф}}^{\text{SO}_2} = 20\% \text{ от ПДК}^{\text{SO}_2} \quad \text{ПДК}^{\text{SO}_2} = 0,5 \text{ мг/м}^3;$$

$$C_{\text{ф}}^{\text{пыли}} = 20\% \text{ от ПДК}^{\text{пыли}} \quad \text{ПДК}^{\text{пыли}} = 0,15 \text{ мг/м}^3.$$

4) Рассчитать ПДВ отдельно по каждому выбрасываемому веществу с учетом фоновых концентраций  $C_{\text{ф}}$ , мг/м<sup>3</sup>;

5) Определить требуемую степень очистки и дать рекомендации по снижению выбросов, если фактический выброс  $M$  какого-либо вредного вещества превышает расчетный норматив (ПДВ).

### Решение задачи:

1. Рассчитывают коэффициент  $f$ :

$$f = 1000 \frac{w_0^2 D}{H^2 \Delta t} = 1000 \cdot 13^2 \cdot 1,1 / 30^2 \cdot (195 - 23,4) = 1,2.$$

Поскольку  $f = 1,2 < 100$ , то расчет необходимо проводить по формулам для нагретых выбросов.

2. Определяют объем  $V_i$  выбрасываемых дымовых газов:

$$V_i = \frac{\pi D^2}{4} \omega_0 = 3,14 \cdot 1,1^2 \cdot 13/4 = 12,35 \text{ (м}^3/\text{с)}.$$

3. Безразмерный коэффициент  $m$  находят по формуле:

$$m = \frac{1}{0,67 + 0,1\sqrt{f} + 0,34\sqrt[3]{f}} = 1 / 0,67 + 0,1 \cdot \sqrt{1,2} + 0,34 \cdot \sqrt[3]{1,2} = 0,88.$$

4. Вычисляют для нагретых выбросов параметр  $v_m$ :

$$v_m = 0,65\sqrt[3]{\frac{V_i \Delta t}{H}} = 0,65 \cdot \sqrt[3]{12,35 \cdot 171,6/30} = 2,69$$

5. Поскольку  $(v_m = 2,69) > 2$ , то  $n = 1$ .

6. Определяют наибольшую ожидаемую концентрацию вредных веществ в приземном слое атмосферы по формуле:

$$C_m = \frac{AMFmn\eta}{H^2 \sqrt[3]{V_i \Delta t}}$$

$$C_m^{SO_2} = 200 \cdot 6,0 \cdot 1,0 \cdot 0,88 \cdot 1,0/30^2 \cdot \sqrt[3]{12,35 \cdot 171,6} = 0,09135 \text{ (мг/м}^3\text{)};$$

$$C_m^{CO} = 200 \cdot 13,0 \cdot 1,0 \cdot 0,88 \cdot 1,0/30^2 \cdot \sqrt[3]{12,35 \cdot 171,6} = 0,19792 \text{ (мг/м}^3\text{)};$$

$$C_m^{NO_2} = 200 \cdot 0,87 \cdot 1,0 \cdot 0,88 \cdot 1,0/30^2 \cdot \sqrt[3]{12,35 \cdot 171,6} = 0,01325 \text{ (мг/м}^3\text{)};$$

$$C_m^{\text{пыли}} = 200 \cdot 13,3 \cdot 1,0 \cdot 0,88 \cdot 1,0/30^2 \cdot \sqrt[3]{12,35 \cdot 171,6} = 0,60745 \text{ (мг/м}^3\text{)}.$$

7. Находят расстояние  $X_m$  (м) от источника выбросов, на котором приземная концентрация  $C$  (мг/м<sup>3</sup>) при неблагоприятных метеорологических условиях достигает максимального значения  $C_m$  по формуле:

$$x_m = \frac{5-F}{4} dH$$

Так как  $(v_m = 2,69) > 2$ , то  $d$  находят по формуле

$$d = 7\sqrt{v_m} (1 + 0,28 \sqrt[3]{f}) = 14,92$$

Тогда:

$$X_m^{SO_2} = X_m^{CO} = X_m^{NO_2} = 5 - 1/4 \cdot 14,92 \cdot 30 = 447,6 \text{ (м)}$$

$$X_m^{\text{пыли}} = 5 - 3/4 \cdot 14,92 \cdot 30 = 223,8 \text{ (м)}.$$

8. Сравнение фактического загрязнения (с учетом фоновой концентрации) с санитарно-гигиеническим нормативом показывает, что только выбросы пыли загрязняют воздушный бассейн:

$$[C_m^{\text{пыли}} + C_{\phi}^{\text{пыли}} = 0,6075 + 0,03 = 0,6375 \text{ (мг/м}^3\text{)}] > (\text{ПДК}^{\text{пыли}} = 0,15 \text{ мг/м}^3).$$

9. Проводят расчет ПДВ по каждому выбрасываемому веществу по формуле:

$$\text{ПДВ} = \frac{(\text{ПДК} - C_{\phi}) H^2 \sqrt[3]{V_i \Delta t}}{AFmn\eta}$$

$$\text{ПДВ}^{CO} = (5-1) \cdot 30^2 \cdot \sqrt[3]{12,35 \cdot 171,6} / 200 \cdot 1,0 \cdot 0,88 \cdot 1,0 = 262,64 \text{ (г/с)}$$

$$\begin{aligned} \text{ПДВ}^{\text{NO}_2} &= (0,25-0,05) \cdot 30^2 \cdot \sqrt[3]{12,35 \cdot 171,6} / 200 \cdot 1,0 \cdot 0,88 \cdot 1,0 = 13,13 \text{ (г/с)}; \\ \text{ПДВ}^{\text{SO}_2} &= (0,5-0,1) \cdot 30^2 \cdot \sqrt[3]{12,35 \cdot 171,6} / 200 \cdot 1,0 \cdot 0,88 \cdot 1,0 = 26,264 \text{ (г/с)}; \text{ПДВ}^{\text{пыли}} = \\ &= (0,15-0,03) \cdot 30^2 \cdot \sqrt[3]{12,35 \cdot 171,6} / 200 \cdot 1,0 \cdot 0,88 \cdot 1,0 = 7,88 \text{ (г/с)} \end{aligned}$$

Анализ проведенных расчетов показывает, что фактический массовый выброс  $M$  по газообразным веществам ( $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ) не превышает расчетных значений ПДВ, а по пыли превышает ( $M^{\text{пыли}} = 13,3 \text{ г/с}$ ,  $\text{ПДВ}^{\text{пыли}} = 7,88 \text{ г/с}$ ). Поэтому необходимо разработать мероприятия по снижению выбросов пыли для достижения норматива. Требуемая степень очистки от пыли:

$$E = (M - \text{ПДВ}) \cdot 100\% / M = (13,3 - 7,88) \cdot 100\% / 13,3 = 40,75 \text{ (\%)}.$$

Для улавливания пыли можно рекомендовать циклон соответствующей производительности.



**Электронный учебно-методический комплекс**

**Раздел контроля знаний**

**ЭКОЛОГИЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

**Перечень вопросов, выносимых на зачет**

**Минск 2020**

## ПЕРЕЧЕНЬ ВОПРОСОВ, ВЫНОСИМЫХ НА ЗАЧЕТ

1. Радиоактивное загрязнение территории РБ
2. Радиоактивное излучение, соотношение единиц измерения, дезактивация источников излучения
3. Загрязнение атмосферного воздуха в РБ
4. Загрязнение водного бассейна РБ
5. Земельные ресурсы РБ
6. Отходы производства и ТБО в РБ
7. Состояние климата в РБ
8. Влияние энергетики на состояние окружающей среды
9. Классификация отраслей промышленности по степени опасности для окружающей среды
10. Негативное воздействие ТЭС на ОС
11. Воздействие на ОС при сжигании различных видов топлива
12. Тяжелые металлы и естественные радионуклиды.
13. Влияние Диоксида серы ( $SO_2$ ) (сернистый газ, сернистый ангидрид) на ОС и человека
14. «Смог Лондонского типа».
15. Влияние оксидов азота ( $NO_x$ ) на ОС и человека.
16. Кислотные дожди
17. Механизмы разрушения озона
18. Смог «Лос-Анджелесского типа».
19. Влияние монооксида углерода (CO) на ОС и человека
20. Влияние диоксида углерода ( $CO_2$ ) на ОС и человека
21. Твердые выбросы, бензапирен
22. Тепловое загрязнение от ТЭС.
23. Схема воздействия АЭС на ОС с описанием основных источников
24. Экологические ограничения использования атомной энергетики
25. ГЭС и ОС, положительное воздействие.
26. Прямое и косвенное влияние ГЭС на окружающую среду

27. Ограничение выбросов вредных веществ в атмосферу. Снижение выбросов диоксида серы  $SO_2$
28. Сероочистка жидких топлив.
29. Сероочистка твердых топлив.
30. Газификация топлив.
31. Очистка от соединений серы продуктов сгорания топлив (сероочистка дымовых газов)
32. Мокрая известняковая технология.
33. Мокрая известковая технология.
34. Использование скрубберов Вентури
35. Мокро-сухая известковая технология. Сухие технологии.
36. Сжигание угля в кипящем слое
37. Образование оксидов азота при горении органических топлив «Топливные»  $NO_x$ .
38. «Термические»  $NO_x$ . «Быстрые» оксиды азота.
39. Технологическое подавление образования  $NO_x$
40. Рециркуляция дымовых газов
41. Очистка дымовых газов от оксидов азота
42. Селективное каталитическое восстановление оксидов азота
43. Селективное некаталитическое восстановление оксидов азота
44. Предельно допустимые концентрации
45. Предельно допустимые выбросы
46. Рассеивание вредных выбросов в атмосфере

**Электронный учебно-методический комплекс**

**Вспомогательный раздел**

**ЭКОЛОГИЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

**Учебная программа**

**Минск 2020**

## **УЧЕБНАЯ ПРОГРАММА**

**Белорусский национальный технический университет**

**УТВЕРЖДАЮ**

Проректор по учебной работе  
Белорусского национального  
технического университета

\_\_\_\_\_ О.К. Гусев

\_\_\_\_\_ /уч.  
Регистрационный № УД-\_\_\_\_\_

## **ЭКОЛОГИЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

**Учебная программа учреждения высшего образования**

**по учебной дисциплине для специальности**

**1-43 01 05 Промышленная теплоэнергетика**

**2018**

Учебная программа составлена на основе образовательного стандарта ОСВО 1-36 01 01-2013

**СОСТАВИТЕЛЬ (И):**

**И.Н. Прокопеня**, старший преподаватель кафедры «Промышленная теплоэнергетика и теплотехника» Белорусского национального технического университета

**РЕЦЕНЗЕНТЫ:**

**Кафедра «Промышленная теплоэнергетика»** Гомельского Государственного технического университета им. П.О. Сухого  
(протокол № \_\_\_\_ от \_\_\_\_\_ 201 г.);

**К.Э. Гаркуша**, доцент кафедры «Энергетика» Белорусского аграрного технического университета, кандидат технических наук, доцент

**РЕКОМЕНДОВАНА К УТВЕРЖДЕНИЮ:**

Кафедрой «Промышленной теплоэнергетики и теплотехники» Белорусского национального технического университета

(протокол № \_\_\_\_ от «\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.)

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_ **В.А. Седнин**

Методической комиссией Энергетического факультета Белорусского национального технического университета

(протокол № \_\_\_\_ от «\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.)

Председатель методической \_\_\_\_\_ **И.В. Новаш**  
комиссии

## Пояснительная записка

Учебная программа «Экология теплоэнергетических систем» разработана для специализации 1-43 01 05 02 Теплоэнергетические установки и системы теплоснабжения специальности 1-43 01 05 Промышленная теплоэнергетика высших учебных заведений.

Целью дисциплины является – формирование научного мировоззрения и системы знаний в области инженерной экологии, энергетических проблем охраны окружающей среды и рационального использования энергетических ресурсов.

Основной задачей учебной дисциплины является приобретение системных знаний, включающих:

- сущность и задачи экологических мероприятий в энергетике, основные аспекты экологии теплоэнергетических систем;
- анализ характеристик выбросов энергетических систем и установок, промышленных предприятий и транспорта и их влияния на окружающую среду;
- методы и средства снижения вредного влияния теплоэнергетических процессов на окружающую среду;
- выбор, расчет и эксплуатация очистной аппаратуры и оборудования для улавливания вредных веществ технологических и тепловых выбросов и обеспечения нормативного состояния окружающей среды;
- выбор и расчет оптимальных схем энергоснабжения, обеспечивающих рациональное использование природной воды и атмосферного воздуха.

В результате освоения курса «Экология теплоэнергетических систем» студент должен

### **знать:**

- виды негативных воздействий ТЭС, АЭС, ГЭС, котельных и транспорта на окружающую среду;
- основные характеристики выбросов энергетических систем и установок промышленных предприятий и транспорта и их влияние на окружающую среду;
- методы и средства снижения вредного влияния теплоэнергетических процессов на окружающую среду;
- методы и средства очистки сточных вод и газообразных выбросов вредных веществ от энергоустановок;
- основы расчетов рассеивания и нормативов предельно допустимых выбросов вредных веществ в атмосферу; экономической эффективности мероприятий по очистке газопылевых выбросов; работы комплекса очистных сооружений, а также ущерба от загрязнения поверхности Земли твердыми отходами, сточными водами и от загрязнения атмосферы.

### **уметь:**

- проводить анализ характеристик выбросов энергетических систем и установок, промышленных предприятий и транспорта и их влияния на окружающую среду;
- проводить анализ работы комплекса очистных сооружений;

– разрабатывать рекомендации по энергосбережению, утилизации и использованию вторичных энергоресурсов в теплоэнергетических процессах, оценку их экологического эффекта;

– разрабатывать экологические и природоохранные мероприятия при работе энергетических систем и установок промышленных предприятий;

– проводить расчеты рассеивания и нормативов предельно допустимых выбросов вредных веществ в атмосферу.

**владеть:**

- терминологией в области экологии теплоэнергетических систем;

- методикой технико-экономических расчетов экономической эффективности мероприятий по очистке газопылевых выбросов; работы комплекса очистных сооружений, а также ущерба от загрязнения поверхности Земли твердыми отходами, сточными водами и от загрязнения атмосферы;

- экспериментальными методами оценки экологической эффективности применения различных очистных установок.

Освоение данной учебной дисциплины обеспечивает формирование следующих компетенций:

АК-1. Уметь применять базовые научно-теоретические знания для решения теоретических и практических задач.

АК-3. Владеть исследовательскими навыками.

АК-4. Уметь работать самостоятельно.

АК-5. Быть способным порождать новые идеи (обладать креативностью).

АК-6. Владеть междисциплинарным подходом при решении проблем.

АК-7. Иметь навыки, связанные с использованием технических устройств, управлением информацией и работой с компьютером.

АК-8. Обладать навыками устной и письменной коммуникации.

АК-9. Уметь учиться, повышать свою квалификацию в течение всей жизни.

АК-10. Использовать основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности.

АК-11. Применять соответствующий физико-математический аппарат, методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования в физике, химии, экологии для решения проблем, возникших в ходе профессиональной деятельности.

СЛК-3. Обладать способностью к межличностным коммуникациям.

СЛК-6. Уметь работать в коллективе.

ПК-2. На основе анализа показателей режимов, параметров схемы и технического состояния оборудования выявлять причины неоптимальности технологического процесса производства, преобразования, распределения и потребления тепловой энергии и разрабатывать пути их устранения.



ПК-12. Осуществлять современными инструментальными системами диагностирование и мониторинг состояния теплоэнергетического и теплотехнологического оборудования, включая экологические параметры.

ПК-23. Владеть основными принципами энергосбережения и энергоэффективной эксплуатации теплоэнергетических систем и оборудования, в том числе использования новых технологий в энергетике.

ПК-40. Знать и владеть основными положениями по организации эксплуатации теплоэнергетического оборудования промышленного предприятия.

ПК-45. Владеть современными инструментальными системами диагностирования и мониторинга состояния теплоэнергетического и теплотехнологического оборудования, включая экологические параметры.

Согласно учебным планам на изучение дисциплины отведено: 74 часа, в том числе 48 часа аудиторных занятий, из них лекции 32 часа, практических занятий 16 часа и 26 часов на самостоятельную работу студентов.

Распределение аудиторных часов по курсам, семестрам и видам занятий приведено ниже.

Таблица 1.

Очная форма получения высшего образования					
Курс	Семестр	Лекции, ч.	Лабораторные занятия, ч.	Практические занятия, ч.	Форма текущей аттестации
5	9	32		16	зачет

## **СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ**

### ***Введение. КЛАССИФИКАЦИЯ ОТРАСЛЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ ПО СТЕПЕНИ ОПАСНОСТИ ДЛЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ***

Коэффициент токсичности выбросов (сбросов). Классификация отраслей промышленности по коэффициенту токсичности выбросов в атмосферу и сбросов в воду. Отрасли промышленности, обладающие высокой степенью экологической опасности.

### ***Раздел I. ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ И ЕЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ***

#### **Тема 1. ВОЗДЕЙСТВИЕ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ (ТЭС) НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ**

Виды негативных воздействий ТЭС на окружающую среду: загрязнение атмосферы взвешенными частицами (сажа, зола) и химическими веществами (SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO, CO<sub>2</sub> и т.д.); «парниковый эффект»; гигантское потребление кислорода; загрязнение литосферы твердыми отходами (шлаки, золоотвалы), осаждение на поверхности почвы вредных выбросов и миграция их в глубь литосферы; непомерное возрастание потребления воды, загрязнение «сточными водами»; «кислотные дожди»; «тепловые выбросы»; другие негативные воздействия, в том числе шумовое и электромагнитное.

#### **Тема 2. ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ОГРАНИЧЕНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ**

Воздействие атомных электрических станций (АЭС) на окружающую среду: радиационное, химическое, тепловое (тепловлажностное) и урбанизационное. Преимущества АЭС перед другими видами электростанций. Трудности, сопровождающие повседневную работу АЭС. Проблема захоронения радиационных отходов. Ликвидация АЭС после допустимых сроков эксплуатации.

#### **Тема 3. ВОЗДЕЙСТВИЕ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ (ГЭС) НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ**

Положительное и отрицательное воздействие ГЭС на природные условия затрагиваемых территорий. Косвенное воздействие ГЭС на окружающую среду.

### ***Раздел II. ОГРАНИЧЕНИЕ ВЫБРОСОВ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ В АТМОСФЕРУ***

#### **Тема 4. ХАРАКТЕРИСТИКА ОСНОВНЫХ ЗАГРЯЗНИТЕЛЕЙ АТМОСФЕРЫ, ИХ ВЛИЯНИЕ НА ЖИВЫЕ ОРГАНИЗМЫ**

Основные загрязнители атмосферы: сернистый газ ( $\text{SO}_2$ ), оксиды азота ( $\text{NO}_x$ ), монооксид углерода ( $\text{CO}$ ), углекислый газ ( $\text{CO}_2$ ), бензапирен, твердые выбросы. Классификация промышленных пылей. Влияние основных загрязнителей атмосферы на живые организмы и окружающую среду.

#### **Тема 5. МЕРОПРИЯТИЯ ПО ОГРАНИЧЕНИЮ ВЫБРОСОВ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ В АТМОСФЕРУ**

Устранение и уменьшение выбросов путем совершенствования технологических процессов и оборудования. Внедрение безотходных, ресурсо- и энергосберегающих теплотехнологий. Рекуперация и утилизация ценных компонентов из промышленных выбросов. Защита воздушного бассейна путем создания безотходных технологий и многократного последовательного использования теплоты продуктов сгорания. Использование теплоты газообразных отходов в качестве вторичных энергоресурсов (ВЭР). Взаимосвязь технологии и энергетики. Комплексное энерготехнологическое использование топлива. Разработка новых видов топлив и энергетических процессов, обеспечивающих чистоту окружающей среды.

#### **Тема 6. ОБЕСПЫЛЕНИЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ ГАЗОВ**

Основные свойства промышленных пылей: дисперсность и размер частиц, форма, химический состав, воспламеняемость и взрывоопасность, смачиваемость, плотность, абразивность, угол естественного откоса, коагуляция (укрупнение) пыли, удельное электрическое сопротивление. Токсичность пыли. Принцип действия промышленных пылеуловителей. Классификация пылеуловителей. Сухие пылеуловители: циклоны, рукавные фильтры. Аппараты мокрой очистки газов. Электрофильтры. Фильтры для тонкой очистки газов от частиц и капельной жидкости. Выбор методов и аппаратов для улавливания промышленных пылей.

#### **Тема 7. СНИЖЕНИЕ ВЫБРОСОВ ДИОКСИДА СЕРЫ $\text{SO}_2$**

Удаление серы из топлива до ее сжигания. Очистка от соединений серы продуктов сгорания топлив (сероочистка дымовых газов): мокрая известняковая технология, мокрая известковая технология, использование скрубберов Вентури, мокро-сухая известковая технология, сухие технологии. Снижение вредных выбросов соединений серы при использовании новых технологий сжигания. Сжигание угля в кипящем слое.

#### **Тема 8. МЕТОДЫ СНИЖЕНИЯ ВЫБРОСОВ ОКСИДОВ АЗОТА**

Образование оксидов азота при горении органических топлив. «Топливные»  $\text{NO}_x$ , «термические»  $\text{NO}_x$ , «быстрые» оксиды азота. Технологическое подавление образования  $\text{NO}_x$ : рециркуляция продуктов сгорания, ступенчатое сжигание, сжигание с малыми избытками воздуха, снижение объемной плотности теплового потока

в топочном объеме, комбинация ступенчатого сжигания и малых избытков воздуха при сниженных тепловых нагрузках, уменьшение подогрева воздуха, впрыск пара (воды) в топку и т.д. Очистка дымовых газов от оксидов азота: селективное каталитическое восстановление (СКВ) оксидов азота, селективное некаталитическое восстановление (СНКВ) оксидов азота, гибридная схема, объединяющая СКВ и СНКВ.

### ***Раздел III. НОРМИРОВАНИЕ ВЫБРОСОВ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ***

#### **Тема 9. ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМЫЕ КОНЦЕНТРАЦИИ (ПДК) И ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМЫЕ ВЫБРОСЫ (ПДВ)**

Показатель ПДК различных веществ в приземном слое атмосферы. Класс опасности вещества. Виды ПДК по санитарным нормам. Максимально-разовая и среднесуточная ПДК. Значения ПДК для основных загрязнителей атмосферы, принятые в Республике Беларусь. Предельно допустимый выброс (ПДВ) вредного вещества. Нормы ПДВ. Принципы определения базовых нормативов платы за загрязнение окружающей среды.

#### **Тема 10. РАССЕИВАНИЕ ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ В АТМОСФЕРЕ**

Классификации источников выброса вредных веществ в зависимости от высоты устья источников выброса вредных веществ над уровнем земной поверхности, по геометрическим параметрам, по режиму действия, по характеру организации выбросов. Распределение концентрации вредных веществ в атмосфере от организованного источника выброса.

### ***Раздел IV. ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД***

#### **Тема 11. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД**

Общая характеристика производственных сточных вод. Физико-химические методы очистки сточных вод: коагуляция, флокуляция, флотация, адсорбция, ионный обмен, экстракция, обратный осмос, электрохимические методы, выпаривание (дистилляция), кристаллизация. Преимущества физико-химических методов очистки сточных вод по сравнению с биохимическими. Химические методы: окисление и восстановление вредных примесей, нейтрализация. Очистка сточных вод ТЭС и АЭС.

#### **Тема 12. БИОЛОГИЧЕСКАЯ ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД**

Методы биологической очистки сточных вод – аэробный и анаэробный. Поля орошения, поля фильтрации, биологические пруды. Искусственные сооружения биологической очистки: биофильтры, аэротенки и окситенки. Метантеки.

## ***Раздел V. ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ГОРОДОВ***

### **Тема 13. РОЛЬ АВТОТРАНСПОРТА В ЗАГРЯЗНЕНИИ ГОРОДОВ**

Состав выхлопных газов автотранспорта. Токсичность компонентов отработанных газов и их влияние на здоровье человека. Методы снижения вредных выхлопов.

### **Тема 14. ПРОМЫШЛЕННЫЕ ОТХОДЫ ИХ УТИЛИЗАЦИЯ**

Классификации отходов, основанные на систематизации их по отраслям промышленности, возможностям переработки, токсичности. Способы утилизации отходов, достоинства и недостатки.

**УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**  
очная форма получения высшего образования

Номер раздела, темы, занятия	Название раздела, темы, занятия; перечень изучаемых вопросов	Количество аудиторных часов					Количество часов УСП	Форма контроля знаний
		Лекции	Практические занятия	Семинарские занятия	Лабораторные занятия	Иное		
<b>СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ</b>								
<b>1</b>	<b>Классификация отраслей промышленности по степени опасности для окружающей среды</b>	<b>1</b>						
<b>2</b>	<b>Энергетическая промышленность и ее воздействие на окружающую среду</b>	<b>8</b>	<b>2</b>				<b>4</b>	
<b>2.1</b>	Воздействие тепловых электрических станций (ТЭС) на окружающую среду	4	2					
<b>2.2</b>	Экологические ограничения использования атомной энергетики	2					2	
<b>2.3</b>	Воздействие гидроэлектростанций (ГЭС) на окружающую среду	2					2	
<b>3</b>	<b>Ограничение выбросов вредных веществ в атмосферу</b>	<b>14</b>	<b>8</b>				<b>8</b>	
<b>3.1</b>	Характеристика основных загрязнителей атмосферы, их влияние на живые организмы	2	2					
<b>3.2</b>	Мероприятия по ограничению выбросов вредных веществ в атмосферу.						2	
<b>3.3</b>	Обеспылевание промышленных газов	4	2				2	
<b>3.4</b>	Снижение выбросов диоксида серы SO <sub>2</sub>	4	2				2	

Номер раздела, темы, занятия	Название раздела, темы, занятия; перечень изучаемых вопросов	Количество аудиторных часов					Количество часов УСП	Форма контроля знаний
		Лекции	Практические занятия	Семинарские занятия	Лабораторные занятия	Иное		
3.5	Методы снижения выбросов оксидов азота	4	2				2	
4	<b>Нормирование выбросов загрязняющих веществ</b>	<b>4</b>	<b>4</b>				<b>4</b>	
4.1	Предельно допустимые концентрации (ПДК) и предельно допустимые выбросы (ПДВ)	2	2					
4.2	Рассеивание вредных выбросов в атмосфере	2	2				4	
5	<b>Очистка сточных вод</b>	<b>3</b>	<b>2</b>				<b>4</b>	
5.1	Физико-химические и химические методы очистки сточных вод	2	1				2	
5.2	Биологическая очистка сточных вод	1	1				2	
6	<b>Экологические проблемы городов</b>	<b>2</b>					<b>6</b>	
6.1	Роль автотранспорта в загрязнении городов	1					3	
6.2	Промышленные отходы, их утилизация	1					3	
	Итого за семестр	<b>32</b>	<b>16</b>				<b>26</b>	
	Всего аудиторных часов	<b>48</b>						

## Основная литература

1. Экология энергетики: Учебное пособие / Под общей редакцией В.Я. Путилова. – М.: Издательство МЭИ, 2003. – 716 с.
2. Мельников А.А. Проблемы окружающей среды и стратегия ее сохранения / А.А. Мельников – М.: Академический проект; Гаудеамус, 2009. – 720 с.
3. Стриха И.И. Экологические аспекты энергетики: атмосферный воздух / И.И. Стриха, Н.Б. Карницкий – Мн.: УП»Технопринт», 2001 – 304 с.
4. Панин В.Д. Экология для инженера / В.Д. Панин, А.И Сечин, В.Д Федосов – М.: Издательский дом «Ноосфера», 2001. – 284 с.
5. Зайцев В.А. Промышленная экология / В.А. Зайцев – М.: МХТИ, 2000. – 291 с.
6. Хван Т.А. Промышленная экология / Т.А. Хван – Ростов н/Д: Феникс, 2003. – 320 с.
7. Фридланд С.С. Промышленная экология: основы инженерных расчетов / С.С. Фридланд, Л.В. Ряписова, Н.Р. Стрельцова, Р.Н. Зиятдинов – М.: КолосС, 2008. – 176 с.

## Дополнительная литература

1. Голдовская Л.Ф. Химия окружающей среды / Л.Ф. Голдовская – М.: Мир, 2005. – 295 с.
2. Бадаев В.В. Охрана окружающей среды при эксплуатации АЭС / В.В. Бадаев, Ю.А. Егоров, С.В. Казаков – М., 1990. – 245 с.
3. Садовский А.П. Подходы и обоснование экологического статуса промышленного предприятия / А.П. Садовский, В.В. Абраменко и др. – М.: НПО «Вектор», 1991.- 290 с.
4. Безруких П.П. Экономические проблемы нетрадиционной энергетики / П.П. Безруких – «Энергия», 1995, №8.

## Средства диагностики результатов учебной деятельности

Оценка уровня знаний студента производится по десятибалльной шкале в соответствии с критериями, утвержденными Министерством образования Республики Беларусь.

Для оценки достижений студента рекомендуется использовать следующий диагностический инструментарий:

- защита выполненных на практических занятиях индивидуальных заданий;
- выступление студента на конференции по подготовленному реферату;
- проведение текущих контрольных работ (заданий) по отдельным темам;
- сдача зачета по дисциплине.



## **Перечень тем практических занятий**

1. Выбросы загрязняющих веществ при сжигании органического топлива и охрана атмосферного воздуха.
2. Методы, средства и оборудование очистки газообразных выбросов систем энергетического комплекса и снижение их вредного влияния на окружающую среду.
3. Расчет циклона
4. Расчет электрофильтра.
5. Расчет скруббера Вентури и тканевого рукавного фильтра с регенерацией.
6. Расчет выброса загрязняющих веществ при сжигании топлива в котлоагрегатах котельной.
7. Расчет платы за выбросы в атмосферу загрязняющих веществ от стационарных источников.
8. Расчет рассеивания и нормативов предельно допустимых выбросов вредных веществ в атмосферу.
9. Расчет песколовки-жировки и аэротенка смесителя для очистки сточных вод.

### **Методические рекомендации по организации и выполнению самостоятельной работы студентов**

При изучении дисциплины рекомендуется использовать следующие формы самостоятельной работы:

- контролируемая самостоятельная работа в виде решения индивидуальных задач в аудитории во время проведения практических занятий под контролем преподавателя в соответствии с расписанием;
- управляемая самостоятельная работа, в том числе в виде выполнения индивидуальных расчетных заданий с консультациями преподавателя;
- подготовка рефератов по индивидуальным темам, в том числе с использованием патентных материалов.