

Федеральное агентство по образованию
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального
образования
Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет

Е.А.ЛЕБЕДЕВА

**ОХРАНА ВОЗДУШНОГО БАССЕЙНА ОТ ВРЕДНЫХ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ ВЫБРОСОВ**

Учебное пособие для студентов специальностей
270109.65 Теплогазоснабжение и вентиляция и 140104.65 Промышленная
теплоэнергетика

Утверждено редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия

Нижегород
ННГАСУ
2010

ББК 31.38:762.2
УДК 62-784.2:699.871

Лебедева, Е. А. Охрана воздушного бассейна от вредных технологических и вентиляционных выбросов [текст]: учебное пособие / Е. А. Лебедева; Нижегород. гос. архит. - строит. ун-т. - Нижний Новгород: ННГАСУ, 2009.- 196 с.

Приведены сведения по загрязнению атмосферы технологическими процессами добычи, подготовки и транспортировки органических топлив; процессами сжигания топлив в энергетических и промышленных котлах, печах; вентиляционными выбросами различных технологических процессов.

Рассмотрен комплекс методов очистки технологических и вентиляционных выбросов от загрязняющих веществ.

Рекомендуется студентам, обучающимся по специальностям 270109.65 Теплогазоснабжение и вентиляция, 140104.65 Промышленная теплоэнергетика; может быть использовано при обучении студентов по специальностям 280101.65 Безопасность жизнедеятельности в техносфере, 020802.65 Природопользование и может быть полезно специалистам, работающим в сфере защиты воздушного бассейна от загрязнения.

ББК 31.38:762.2

©Лебедева Е. А., 2010
© ННГАСУ, 2010

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1. КОТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ И ПРОМЫШЛЕННЫЕ ПЕЧИ КАК ИСТОЧНИКИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУШНОГО БАССЕЙНА	7
1.1. Токсичные ингредиенты продуктов сгорания органического топлива	7
1.2. Механизм образования токсичных веществ при сжигании органического топлива	12
1.3. Экологическая характеристика промышленных печей	21
1.4. Экологическая характеристика выбросов котельных установок на органическом топливе	28
1.4.1. Концентрации вредных веществ в продуктах сгорания котлов	28
1.4.2. Расчет массы загрязняющих веществ в выбросах котельной	32
1.5. Топливная промышленность как источник загрязнения воздушного бассейна	39
1.5.1. Газовая и нефтяная отрасли промышленности	39
1.5.2. Добыча газа и нефти	40
1.5.3. Транспортировка газа и нефти	45
1.5.4. Использование газа и нефти	46
1.5.5. Угольная отрасль топливной промышленности	47
1.6. Примеры расчёта	48
2. ВЕНТИЛЯЦИОННЫЕ ВЫБРОСЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ КАК ИСТОЧНИКИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА	52
2.1. Приоритетные загрязняющие вещества. Свойства. Гигиеническая характеристика	53
2.2. Расчет масс загрязняющих веществ в вентиляционных выбросах различных производственных процессов	58
2.2.1. Окрасочное производство	58
2.2.2. Процессы сварки и резки металлов	63
2.2.3. Гальваническое производство	67
2.2.4. Механическая обработка металлов	69
2.3. Примеры расчёта	73
3. ЗАЩИТА ВОЗДУШНОГО БАССЕЙНА ОТ ВЫБРОСОВ СТАЦИОНАРНЫХ ТОПЛИВОСЖИГАЮЩИХ УСТАНОВОК	77
3.1. Технологические методы снижения загрязнения атмосферы топливосжигающими установками	77
3.1.1. Снижение расхода топлива путем повышения эффективности сжигания и снижения потерь теплоты при ее транспортировке и использовании	78
3.1.2. Применение энергосберегающего оборудования для глубокого использования теплоты уходящих газов	80
3.1.3. Эффективное выведение вредных выбросов в атмосферу	84

3.1.4. Методы подавления образования вредных веществ при сжигании топлива	86
3.2. Методы очистки выбросов энергетических установок от вредных веществ	107
3.2.1. Восстановительные методы очистки выбросов энергетических и промышленных котлов от оксидов азота	107
3.2.2. Термическое обезвреживание оксида углерода, сажи, бенз(а)пирена в выбросах промышленных котлов	112
3.2.3. Сорбционные методы очистки продуктов сгорания	118
3.2.4. Способы очистки продуктов сгорания от золы	127
3.3. Комплексные схемы очистки выбросов токсичных веществ в атмосферу	134
3.3.1. Комплексная схема (№1) очистки выбросов котлов от оксидов азота и продуктов неполного сгорания	135
3.3.2. Комплексные схемы (№2, №3) глубокой очистки продуктов сгорания от оксидов азота с дожиганием	136
3.3.3. Комплексные схемы (№4, №5) глубокой очистки продуктов сгорания от оксидов азота и серы	138
3.3.4. Комплексная схема №6 глубокой очистки продуктов сгорания от твердых частиц	141
3.4. Методы снижения выбросов топливной промышленности	141
3.4.1. Добыча и переработка нефти и газа	141
3.4.2. Снижение загрязнения атмосферы факелами газа	143
3.5. Примеры расчета	144
4. ЗАЩИТА ВОЗДУШНОГО БАССЕЙНА ОТ ВРЕДНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ ВЫБРОСОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ	149
4.1. Технологические методы снижения загрязнения атмосферы промышленными выбросами	149
4.2. Методы очистки технологических и вентиляционных выбросов в промышленности	152
4.2.1. Методы термического обезвреживания токсичных веществ	152
4.2.2. Сорбционная очистка	169
4.2.3. Очистка аэрозольных загрязнений методом фильтрации	174
4.2.4. Биологическая очистка	177
4.2.5. Электростатическое улавливание аэрозолей	178
4.2.6. Методы очистки промышленных выбросов от пыли	179
4.3. Примеры расчёта	182
4.3.1. Упрощённый расчёт автономной топочной камеры	182
4.3.2. Расчёт возможности термического обезвреживания вентиляционных выбросов в топках существующих котлов и печей	183
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	189
ПРИЛОЖЕНИЯ	194

ВВЕДЕНИЕ

Биосфера чрезвычайно восприимчива к внешним воздействиям. Несмотря на кажущуюся приспособленность живого оно может существовать только в очень узком диапазоне параметров (состав атмосферы, атмосферное давление, влажность воздуха, температура, и др.). Во второй половине 20 века антропогенное загрязнение уже привело к резкому ухудшению условий жизни человечества.

Особую тревогу вызывает возрастающее загрязнение воздушного бассейна. Атмосфера – наиболее мобильная составляющая окружающей среды, так как воздушные массы переносят загрязнение на значительные расстояния от источников загрязнения. Отсюда - охрана воздушного бассейна стала проблемой не отдельно взятой страны, а человечества в целом.

Технический процесс привел к глобальному расходованию природных ресурсов, усугубил негативное воздействие всех отраслей промышленности на воздушный бассейн. Загрязнение атмосферы в настоящее время настолько велико, что в большинстве промышленных центров мира концентрации вредных веществ в периоды неблагоприятных метеоусловий (НМУ), а иногда и круглогодично превышают гигиенические нормативы.

Рассмотрим экологическую ситуацию крупных промышленных центров на примере Н.Новгорода. Специфика размещения промышленного потенциала в Н.Новгороде без учета орографических особенностей местности привела к созданию в городе локальных зон экологического риска. Основные источники загрязнения: предприятия машиностроения, нефтепереработки, стройиндустрии и др. расположены в низкой, заречной части города и без учета розы ветров. Исторически сложилось так, что рабочие поселки, а затем жилые районы, возведенные рядом с промышленными комплексами, оказались в экологически депрессивных условиях. Жилые массивы: пос. Пролетарский, з-д «Красная Этна», микрорайон №2 Соцгорода Автозавода, пос. Северный, Сормовская и Костарихинская промзоны характеризуются

«сильными», «очень сильными» и «чрезвычайным» уровнем загрязнения.

Проблема защиты воздушного бассейна стала настолько актуальной, что ни один технологический объект не может быть утвержден без наличия раздела «Охрана воздушного бассейна» в проектной документации, особенно в условиях высокого фонового загрязнения атмосферы.

Промышленные выбросы можно разделить на технологические и вентиляционные. Состав как технологических, так и вентиляционных выбросов зависит от специфики технологических процессов, в том числе качества исходного сырья, объема выпускаемой продукции, количества технологических звеньев, в которых выделяются загрязнения и пр.

Анализ различных производственных процессов показывает, что преобладающее загрязнение создают все отрасли топливной промышленности; технологические установки, использующие различные виды органического топлива, а также вентиляционные выбросы промышленных производств.

В соответствии с Экологической доктриной Российской Федерации [1] законами России «Об охране окружающей среды» [2] и «Об охране атмосферного воздуха» [3] для всех технологических процессов, которые сопровождаются выбросами вредных веществ в атмосферу, должны быть предусмотрены природоохранные мероприятия, сокращающие или (что лучше) устраняющие вредное воздействие на атмосферный воздух.

В настоящее время разработаны и утверждены Госкомприроды России методики расчета выбросов вредных веществ различными технологическими процессами [4-14].

Ниже приведена характеристика основных вредных выбросов энергетических и промышленных котлов, печей, систем вентиляции, а также комплекс мероприятий и оборудование для снижения выбросов загрязняющих веществ.

1. КОТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ И ПРОМЫШЛЕННЫЕ ПЕЧИ КАК ИСТОЧНИКИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУШНОГО БАСЕЙНА

Основной вклад в загрязнение воздушного бассейна вносят процессы сжигания органического топлива, в том числе котельные установки и промышленные печи.

При сжигании топлива образуются следующие токсичные вещества: оксид углерода CO (4-й класс опасности), диоксид серы SO₂ (3-й класс опасности), диоксид азота NO₂ (2-й класс опасности), полициклические углеводороды (главным образом бенз(а)пирен C₂₀H₁₂ (1-й класс опасности)), а также взвешенные вещества (зола, сажа и коксовые остатки), токсичность которых зависит от содержащихся в них примесей.

В уходящих газах промышленных печей кроме указанных выше содержатся вредные вещества, задействованные в технологических процессах или образовавшиеся в топке при действии высоких температур. Например, при плавке цветных металлов выделяются дополнительно фториды HF, цианиды HZn, большое количество твёрдых частиц и др.

1.1. Токсичные ингредиенты продуктов сгорания органического топлива

Воздействие процессов сжигания топлива на качество атмосферного воздуха зависит от состава используемого топлива и способа его сжигания.

Элементарный состав рабочей массы топлива

$$C^r + H^r + S^r + O^r + N^r + W^r + A^r = 100\% \quad (1.1)$$

Все элементы топлива участвуют в образовании токсичных веществ в процессе горения. Наименьшую экологическую опасность представляет сжигание топлив, состоящих из углерода C^r и водорода H^r и не содержащих серы S^r, топливного азота N^r, минеральной составляющей A^r (например, природного газа).

Продукты полного сгорания углеводородной части топлив – CO₂ и H₂O не являются токсичными. Тем не менее процесс даже полного сгорания топлива оказывает негативное воздействие на окружающую среду:

- возрастание содержания CO_2 в атмосфере способствует изменению температурных условий на планете вследствие парникового эффекта;
- увеличивается тепловое загрязнение атмосферы вследствие достаточно высокой температуры уходящих газов;
- для процессов горения топлива потребляется большой объём кислорода из зоны дыхания человека.

В случае неполного сгорания воздушный бассейн загрязняется веществами, большинство из которых токсичны (CO , сажа, углеводороды, в том числе бенз(а)пирен и др.)

При сжигании всех видов топлив в условиях высоких температур образуются оксиды азота – NO_x ($\text{NO} + \text{NO}_2$). Содержание NO составляет 95-98%, а NO_2 только 2-5%. При движении по газовому тракту соотношение NO_x не изменяется, но при выбросе в атмосферу более 70% NO окисляется до NO_2 . Образование NO_x в топочной камере увеличивается при наличии азота N^r в рабочей массе топлива.

Содержание серы (S^r) в составе топлива приводит к образованию в топочной камере и выбросу в атмосферу оксидов SO_x ($\text{SO}_2 + \text{SO}_3$), причём SO_2 – (98 – 99)% SO_x , а SO_3 – (1-2)% SO_x .

Минеральная составляющая A^r обуславливает выброс частиц золы с продуктами сгорания в воздушный бассейн.

Свойства вредных веществ. Гигиеническая характеристика

Оксид углерода. Оксид углерода (CO) – бесцветный горючий газ, не имеющий запаха, слабо растворимый в воде [16-18]. Молекулярная масса – 28.01, плотность – 1,25 г/л (при $t = 0^\circ\text{C}$ и $p = 1$ атм). Токсичность CO связана с его способностью реагировать с гемоглобином крови со скоростью почти в 200 раз превышающей скорость связывания кислорода гемоглобином. Отсюда – развитие гипоксии (кислородного голодания). Оксид углерода относится к 4 классу опасности. $\text{ПДК}_{\text{MP}} = 5 \text{ мг/м}^3$, $\text{ПДК}_{\text{CC}} = 3 \text{ мг/м}^3$ [15].

Углеводороды. При неполном сжигании топлив образуются углеводороды различных классов. Наибольшую экологическую опасность представляют высокомолекулярные соединения – полиядерные ароматические углеводороды (ПАУ). Доказано, что ПАУ с числом бензольных колец ≥ 5 обладают канцерогенным эффектом, т.е. способствуют возникновению и развитию онкологических заболеваний. Наиболее сильным и достаточно изученным канцерогеном является соединение с пятью бензольными кольцами – $C_{20}H_{12}$ – **бенз(а)пирен (БП)** [19, 21, 22]. Молекулярная масса – 252. Образованный при сжигании бенз(а)пирен сорбируется на частичках сажи или других твердых частиц. В чистом виде БП – твёрдое кристаллическое вещество желтоватого цвета. Особая опасность бенз(а)пирена заключается в том, что он способен накапливаться в организме, подобно радиоактивным веществам. Кроме того, БП обладает высокой химической стойкостью, а, следовательно, распространяется на значительные расстояния от источника выделения. Поступивший в воздушный бассейн с продуктами сгорания топлив БП оседает на почву, растительность, а затем, смытый атмосферными осадками, загрязняет водный бассейн. Исследования показывают, что БП фиксируется практически во всех компонентах окружающей среды [23].

БП воздействует по мере накопления, поэтому для него нормируется среднесуточная величина ПДК. Класс опасности – 1, $ПДК_{СС} = 0,1 \text{ мкг}/100\text{м}^3$ (в атмосферном воздухе).

Сажа. Сажа – мелкодисперсное малореакционное вещество (размер частиц - менее 1 мкм) черного цвета. Воздействие чистой сажи на организм – механическое. Мелкодисперсная сажа, частицы которой соразмерны с порами легких человека, осаждается на поверхности легких. Это приводит к стеснению дыхания. Класс опасности сажи [15] – 3, $ПДК_{МР} = 0,15 \text{ мг}/\text{м}^3$; $ПДК_{СС} = 0,05 \text{ мг}/\text{м}^3$. Особая опасность сажи в том, что она обладает высокой сорбционной способностью по отношению к парообразному бенз/а/пирену. В этом случае сажа окажется канцерогенно активной.

Оксиды азота. При сжигании топлив оксиды азота образуются в виде N_2O , NO и NO_2 . Сумму оксидов азота обозначают как NO_x . Гемоксид азота (N_2O) образуется в начальном участке факела, а затем окисляется до оксида азота (NO), то есть не выбрасывается в атмосферу с продуктами сгорания.

В топочной камере образуются преимущественно оксиды азота (NO) в количестве 92 – 98 % от NO_x .

Диоксиды азота (NO_2) составляют всего (2 – 7)% от суммы NO_x . Однако на выходе из дымовой трубы, т.е. в атмосфере, около 80% NO превращаются в более токсичные – NO_2 .

Оксид азота NO – бесцветный, негорючий газ, слабо растворимый в воде. Молекулярная масса – 30,1; плотность – 1,34 г/л. Класс опасности – 3; $ПДК_{MR} = 0,4 \text{ мг/м}^3$; $ПДК_{CC} = 0,06 \text{ мг/м}^3$.

Диоксид азота (NO_2) – негорючий газ оранжево-красновато-бурого цвета (в зависимости от концентрации), с удушливым запахом. Молекулярная масса – 46,3; плотность – 2,06 г/л. Класс опасности – 3; $ПДК_{MR} = 0,2 \text{ мг/м}^3$; $ПДК_{CC} = 0,04 \text{ мг/м}^3$.

Все оксиды азота оказывают негативное воздействие на здоровье человека. Диоксид азота наиболее токсичный из группы NO_x . Концентрация в 15 мг/м^3 вызывает раздражение глаз; концентрация $200\text{--}300 \text{ мг/м}^3$ опасна даже при кратковременном вдыхании. Попадая в легкие и соединяясь с гемоглобином крови, оксиды азота могут вызвать отек лёгкого и понизить кровяное давление (образуется метгемоглобин).

Особая опасность оксидов азота в том, что они отнесены к коканцерогенам – веществам, стимулирующим в сочетании с канцерогенами развитие онкологических заболеваний.

Диоксид азота оказывает сильное негативное воздействие на растительность. Концентрация $(4\text{--}6) \text{ мг/м}^3$ NO_2 вызывает острое повреждение растений. Длительное воздействие воздуха с концентрацией NO_2 около 2 мг/м^3 приводит к хлорозу растений. Более низкие концентрации, не вызывая видимого вреда, снижают интенсивность роста растений.

Оксиды азота, поглощая естественную радиацию как в ультрафиолетовой, так и в видимой части спектра, снижают прозрачность атмосферы и способствуют образованию фотохимического тумана – смога.

Взаимодействие оксидов азота с углеводородами в атмосферном воздухе приводит к образованию веществ, которые в результате дальнейших превращений образуют пероксиацилнитраты (ПАН), обладающие еще более сильным токсическим действием.

Соединения серы. При сжигании серосодержащих топлив соединения серы образуются в виде сернистого ангидрида (SO_2), серного ангидрида (SO_3) и паров серной кислоты (H_2SO_4). Оксиды серы объединяют в группу SO_x . В топочной камере образуется преимущественно SO_2 . Количество SO_2 составляет (98-99)% от SO_x , а (SO_3) - всего (1-2)%. Газообразный SO_3 при движению по газовому тракту котлов в присутствии водяных паров образует пары серной кислоты - H_2SO_4 .

Наиболее токсичным из сернистых соединений является диоксид серы - сернистый ангидрид SO_2 - ядовитый, удушливый газ с резким запахом. Молекулярная масса – 64, плотность – 2,86 г/л. Класс опасности – 3; ПДК_{МР} = 0,5 мг/м³; ПДК_{СС} = 0,05 мг/м³.

Диоксид серы (SO_2) обладает резко раздражающим действием на дыхательные пути, вызывает заболевания бронхиальной системы, астму и др. заболевания дыхательных органов.

Особая опасность SO_2 заключается в том, что, как и диоксид азота (NO_2), этот газ отнесен к группе коканцерогенов, усиливающих воздействие канцерогенных веществ на организм человека. Кроме того, SO_2 обладает суммацией токсичного воздействия с диоксидом азота NO_2 и некоторыми другими токсичными веществами.

Все сернистые вещества разрушительно воздействуют на растительный мир и даже на строительные конструкции. Токсичное действие SO_2 на растения связано с повреждением поверхности листьев и особенно хвои (лиственные растения ежегодно сбрасывают листву) из-за разрушения

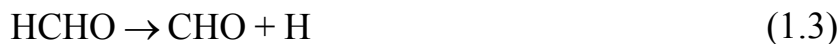
хлорофилла. Содержание в воздухе всего (0,2-0,3) мг/м³ сернистого газа приводит к усыханию сосны за 2-3 года из-за нарушения фотосинтеза и дыхания хвои. Снижается урожайность сельскохозяйственных культур и повышается кислотность почв.

Присутствие в воздухе сернистых соединений ускоряет коррозию металлических конструкций, воздействуют на строительные материалы: кирпич, известняк, мрамор, шифер и др. Особую опасность представляют кислотные дожди - атмосферные осадки в этом случае являются слабыми растворами серной, азотной и азотистой кислот.

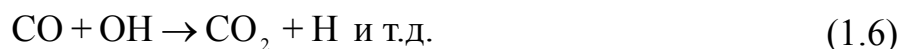
Частицы золы. Зола – мелкодисперсные частицы серого цвета, нерастворимые в воде. Состав золы зависит от вида сжигаемого топлива. Воздействие золы несколько отличается от воздействия нейтральной пыли за счет примесей, содержащихся в золе. Если нейтральная пыль (ПДК_{МР} = 0,5 мг/м³) только механически осаждается в дыхательном тракте, то многие виды золы - токсичны. Например, зола донецких, канско-ачинских и экибастузских углей содержит примеси свинца, мышьяка, ванадия, хрома, цинка; зола всех углей (в т.ч. кузнецких и подмосковных) содержит свободный оксид кремния. Зола мазута содержит пентаксид ванадия. Отсюда – более жесткие нормативы ПДК_{МР} золы твердого топлива - 0,3 мг/м³. Воздействие золы мазута на окружающую среду рассчитывается по содержанию пентаоксида ванадия (нормируется ПДК_{СС} = 0,002 мг/м³).

1.2. Механизм образования токсичных веществ при сжигании органического топлива

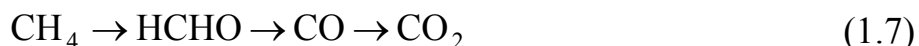
Образование оксидов углерода. При сжигании топлив на начальном участке факела происходит процесс накопления оксидов углерода (СО) по следующим реакциям [19]:



Все реакции проходят с малым энергетическим барьером. Затем по длине топочной камеры происходит выгорание CO через гидроксильный радикал по реакции:



Таким образом, сжигание, например, метана можно представить как цепь следующих последовательных превращений:



Следовательно, оксид углерода окажется в дымовых газах лишь в том случае, если в топочной камере не будут созданы условия для завершения реакции (1.7).

Образование бенз(а)пирена. По температурным параметрам можно выделить низкотемпературный и высокотемпературный механизмы образования бенз(а)пирена ($\text{C}_{20}\text{H}_{12}$) [20, 21, 23].

Низкотемпературный механизм заключается в испарении высокомолекулярных углеводородных фракций, т.е. проходит при температурах лишь несколько больших, чем температура парообразования бенз(а)пирена. Следовательно, этот механизм присущ всем процессам нагрева тяжелых углеводородных фракций. Например, нагрев битума, выполнение асфальтовых покрытий (особенно выгрузка асфальтовой смеси) и др.

Аналогичный процесс имеет место и в топочных камерах на уровне деструкции высокомолекулярных соединений органического топлива, т.е. в начальной фазе факела. Основное же количество бенз(а)пирена (БП) образуется по высокотемпературному механизму.

Высокотемпературный механизм образования БП – это синтез БП из углеводородных фракций топлива в высокотемпературной части камеры сгорания при отсутствии кислорода в зоне синтеза. Термическое воздействие на нефтепродукты, особенно высокомолекулярные (например, мазут-остаточный продукт переработки нефтяных фракций) приводит к разрушению периферийной части молекул с отрывом заместителей в ароматическом ядре.

Этот процесс сопряжен с явлениями конденсации циклической части и образованием все более и более конденсированных систем в направлении:

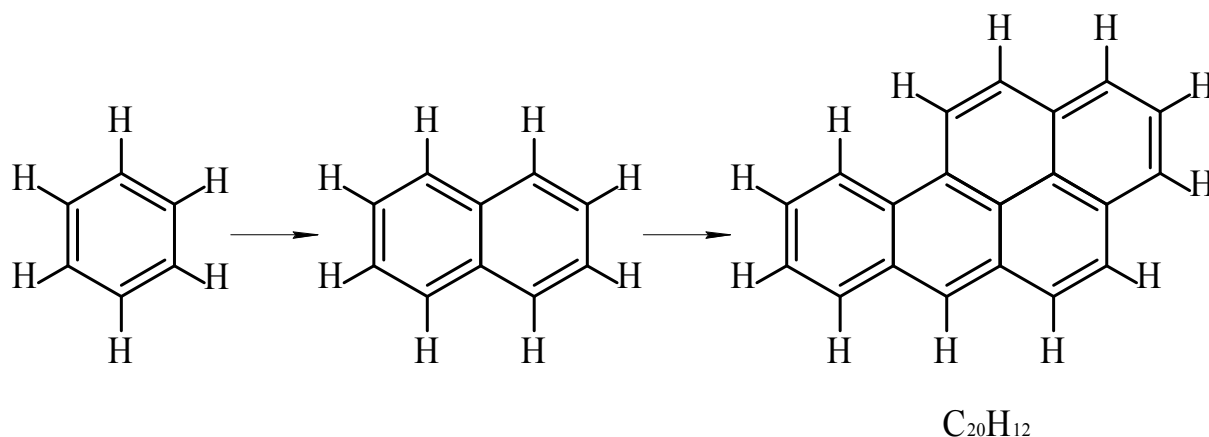


Рис. 1.1. Образование бенз(а)пирена из высокомолекулярных углеводородов

При отсутствии в топливе высокомолекулярных углеводородов, например при сжигании природного газа, механизм образования БП более сложен. Процесс синтеза БП из легких углеводородов основан на образовании ацетилена C_2H_2 , который проходит процесс удлинения цепи с синтезом высокомолекулярных соединений. Т.е. как и в предыдущем варианте, имеет место процессы циклизации, полимеризации и дегидратации.

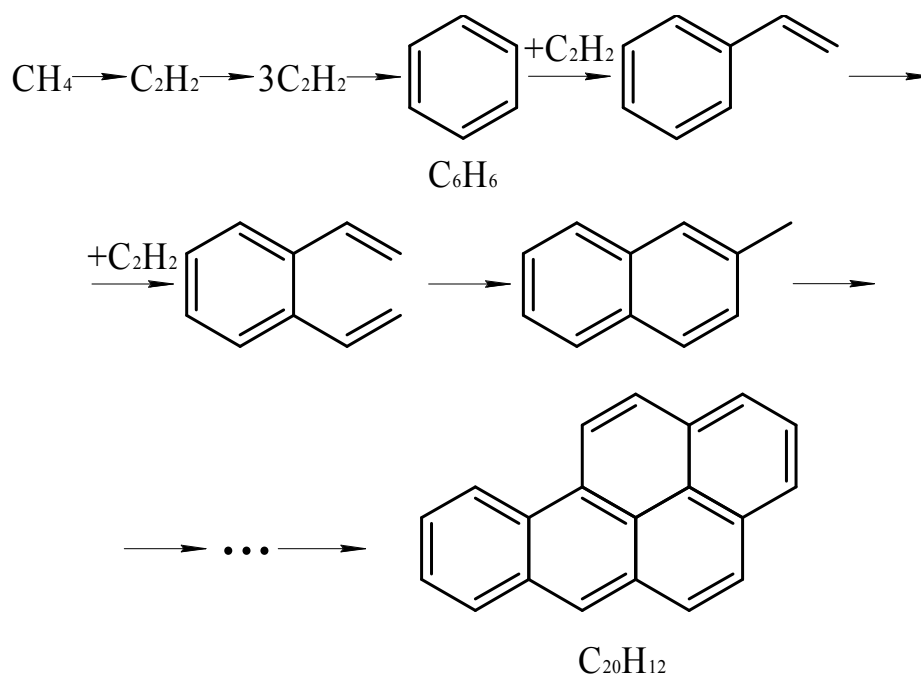


Рис. 1.2. Образование бенз(а)пирена при сжигании природного газа

По вопросу синтеза БП ($C_{20}H_{12}$) из ацетилена C_2H_2 сходятся мнения всех теоретиков этого процесса (Н. В. Лавров, Г. М. Беджер, А. А. Баландин).

Разногласия среди ученых существуют лишь по поводу промежуточных соединений, активно участвующих в образовании БП.

Образование сажи. Сажа является конечным продуктом пиролиза углеводородных фракций. Например, при сжигании метана, процесс образования сажи проходит следующие стадии:



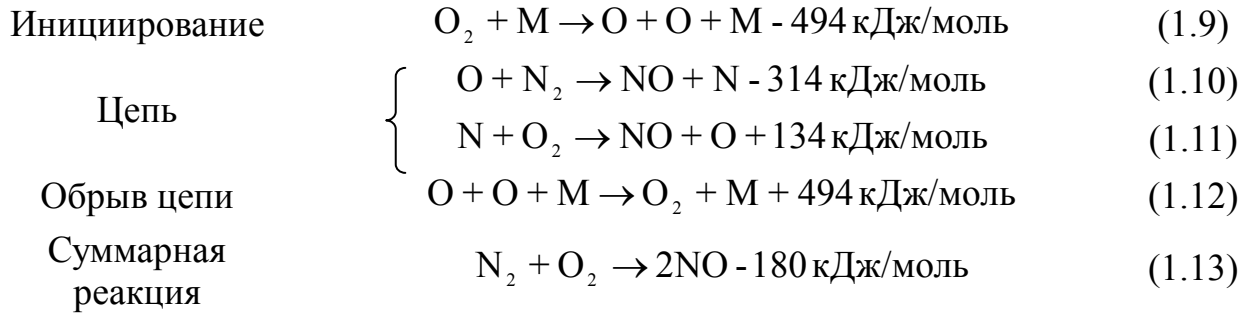
Механизм образования при сжигании углеводородных топлив включает те же процессы циклизации и полимеризации органических соединений, которые протекают в отсутствие кислорода и были изложены выше. Определяющим фактором сажеобразования, по мнению ученых, является относительная легкость отщепления атомов водорода от молекулы углеводорода по сравнению с расщеплением углеродных связей. Термическая гидрогенизация происходит сразу же, как только топливо попадает в высокотемпературную часть факела и продолжается в тех участках топочной камеры, где отсутствует кислород.

Склонность топлив к сажеобразованию напрямую зависит от соотношения углерода к водороду в молекуле углеводорода (С/Н). Чем выше это соотношение, тем больше выделяется сажи при сжигании. Например, при сжигании мазута, состоящего из высокомолекулярных углеводородов, сажи образуется на 1-2 порядка больше, чем при сжигании природного газа, на 92-99% состоящего из легкого углеводорода – метана CH_4 .

Механизм образования оксидов азота. По механизму образования оксиды азота можно разделить на термические (воздушные), топливные и быстрые (фронтальные).

Образование термических оксидов азота. Термические оксиды азота NO_x образуются путём окисления азота, содержащегося в воздухе, подаваемом на горение. Ответственным за образование термических NO_x в высокотемпературной части топки является атомарный кислород.

Я.Б. Зельдовичем была разработана цепная схема образования термических NO_x (на примере оксида азота- NO).



Энергетический барьер реакции E складывается: из энергии, требующейся на образование одного атома кислорода E_1 , а также из энергии активации реакции атома кислорода с молекулой азота E_2 .

$$E = E_1 + E_2 = 492/2 + 314 = 561 \text{ кДж/моль} \quad (1.14)$$

Так как энергетический барьер реакции очень высок, имеет место исключительно сильная (экспоненциальная) зависимость скорости образования NO от температуры (см. рис. 1.3.). Поэтому воздушные или атмосферные NO_x называют также термическими NO_x . В соответствии с [24, 25] заметное образование термических NO_x происходит при температурах, превышающих 1500°C (см. рис. 1.3.).

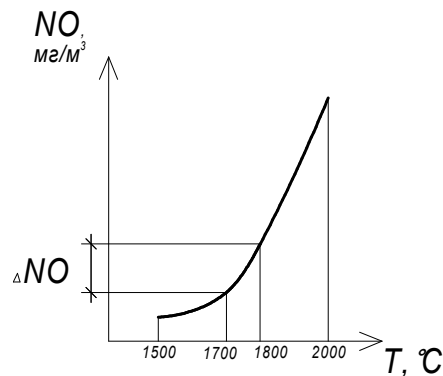


Рис. 1.3. Зависимость концентрации NO от температуры в зоне образования $T, ^\circ\text{C}$

По теории Я.Б.Зельдовича равновесная концентрация оксидов азота, мг/м^3 :

$$[C_{NO}] = 4,6 \cdot \sqrt{C_{O_2} \cdot C_{N_2}} \exp\left[-\frac{21500}{RT}\right], \quad (1.15)$$

где C_{O_2} и C_{N_2} — соответственно концентрации кислорода и азота, %.

Время достижения равновесной концентрации, с.:

$$[\tau_{NO}]_{\max} = \frac{2,06 \cdot 10^{-12}}{\sqrt{C_{N_2}}} \exp\left[-\frac{107500}{RT}\right], \quad (1.16)$$

Значение $[\tau_{NO}]_{\max}$ при различных температурах приведены в табл. 1.1 [19].

Таблица 1.1

T, К	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2300
$[\tau_{NO}]_{max}, c$	910	140	22,9	4,07	1,0	0,27	0,031

Таким образом, выход NO определяется не только максимальной температурой в зоне горения, но и отношением времени реакции ко времени установления равновесных концентраций. Реально полученные концентрации **термических NO** значительно меньше расчётных, т.к. в зоне горения не успевают образовываться равновесные концентрации NO, а реакции обрываются вследствие охлаждения топочных газов.

Опытным путём доказано, что реальные концентрации термических NO составляют лишь 10-15% от равновесных [24, 25]. Следовательно, выход термических NO определяется не только максимальной температурой в факеле, но и характером распределения температур в топке, степенью отвода теплоты от факела и др. условиями. Всё количество оксидов азота, образовавшихся в зоне горения, сохраняется до выхода из топочной камеры.

Концентрация NO увеличивается с возрастанием избыточного кислорода в зоне горения до максимальных величин, устанавливаемых при максимальной температуре в топке (см. рис.1.4 кривые 1, 2 и 3).

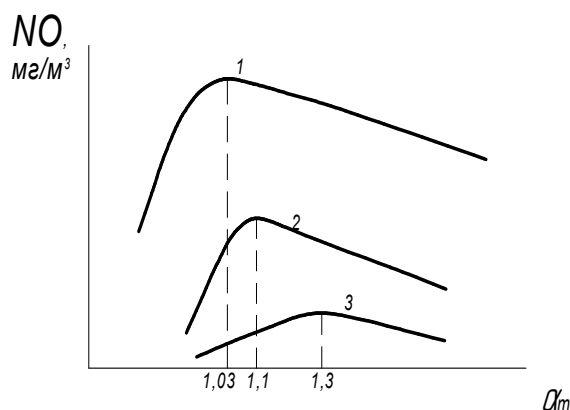


Рис. 1.4. Зависимость концентрации NO от коэффициента избытка воздуха в топке для различных котлов: 1 – энергетические котлы; 2 – промышленные котлы; 3 – отопительные котлы малой мощности

При дальнейшем увеличении концентрации избыточного кислорода синтез оксидов азота снижается в результате уменьшения топочной температуры из-за разбавления избыточным воздухом. Анализ рис.1.4.

показывает, что концентрация термических оксидов азота возрастает с увеличением теплового напряжения топочного объема. При сжигании органического топлива (природный газ, мазут) в энергетических котлах (кривая 1) максимум ($800-1000 \text{ мг/м}^3$) значительно превышает максимум, наблюдаемый в промышленных котлах (кривая 2) ($200-250 \text{ мг/м}^3$), который, в свою очередь значительно выше, чем в отопительных котлах (кривая 3), где не превышает $80-120 \text{ мг/м}^3$.

Таким образом, основными условиями образования **термических NO** являются: высокие температуры в зоне синтеза NO_x и повышенное тепловое напряжение.

Концентрация термических оксидов азота зависит от распределения температур в топке, например, снижается в случае быстрого охлаждения факела.

Образование топливных оксидов азота. Топливные оксиды азота образуются из азотсодержащих соединений топлива, т.е. в случае наличия N^T в рабочей массе топлива. Их наличие (около 15% массы) фиксируется уже при температурах ($800-1100$) $^\circ\text{C}$, т.е. на начальном участке факела.

Основная часть топливных оксидов азота образуется в температурном интервале ($1300-1400$) $^\circ\text{C}$, т.е. значительно более низком, чем термические NO. Это объясняется тем, что в зоне деструкции топлива азот находится в атомарном состоянии, т.е. вступает в реакцию с меньшим энергетическим барьером.

Однако окисляется не весь азот, содержащийся в топливе. Степень перехода азотсодержащих соединений топлива в NO быстро нарастает с увеличением коэффициента избытка воздуха α . Вид азотсодержащих соединений топлива и содержание кислорода в топливе не оказывают влияния на выход топливных оксидов азота.

Образование быстрых (фронтальных) оксидов азота. Механизм образования быстрых оксидов азота разработан Фенимором С.В.

По его мнению, молекулярный азот связывается в топке не только с атомарным кислородом, но и с радикалами СН и С₂ в реакциях с малыми энергетическими барьерами, например:



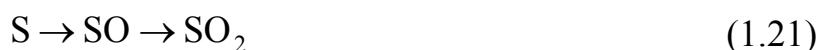
Установлено, что решающую роль в образовании «быстрых» NO играет радикал СН₂ (см. реакцию (1.19)). Образование NO проходит преимущественно по следующей реакции:



Указанные реакции протекают предположительно в узком фронте пламени. Поэтому оксиды азота, образовавшиеся из атомарного азота по реакциям (см. формулы (1.17) - (1.20)) назвали **фронтальными**. Термин **быстрые** эти оксиды азота получили за высокую скорость этих реакций.

Процесс образования быстрых (фронтальных) оксидов азота начинается уже при температурах передней границы фронта пламени $t \approx 800^\circ\text{C}$.

Образование сернистых соединений. Сернистый ангидрид SO₂. При сжигании жидких и твёрдых топлив, содержащих серу в рабочей массе, проходят реакции высокотемпературного окисления серы:



Ответственным за образование SO₂ является атомарный кислород. Если сера содержится в виде сероводорода H₂S (газообразное топливо), то в процессе окисления H₂S участвуют гидроксил OH, атомарный O и молекулярный O₂ кислород по схеме:



Атомарный, молекулярный кислород (O, O₂) и гидроксид OH являются ответственными за образование SO₂ и из других серосодержащих соединений.

Серный ангидрид SO₃. В области избытков воздуха ($\alpha > 1$) по данным термодинамического анализа можно выделить три температурные зоны, различающиеся по механизму образования SO₃ [20].

При температурах выше 1400°C концентрация атомарного кислорода достаточна для образования SO₃ по следующей схеме:



При температурах от 700°C до 1400°C атомарного кислорода недостаточно и SO₃ образуется по реакции монооксида серы с молекулярным кислородом:



При низких температурах – менее 700°C монооксид серы и атомарный кислород отсутствуют, а SO₃ образуется исключительно за счёт молекулярного кислорода в присутствии катализаторов.



Образование паров серной кислоты. В продуктах сгорания всех топлив содержатся водяные пары H₂O, следовательно, может произойти реакция образования серной кислоты:



Газовый тракт котла запроектирован таким образом, чтобы не допустить конденсации паров серной кислоты внутри котельного тракта и дымовой трубы. С этой целью температура уходящих продуктов сгорания серосодержащих топлив поддерживается выше точки росы серной кислоты (во избежание коррозии металлических поверхностей нагрева). Таким образом, содержащиеся в дымовых газах пары серной кислоты выбрасываются в воздушный бассейн, обуславливая кислотные дожди.

Образование твёрдых частиц. При сжигании топлива твёрдые частицы образуются в двух видах: частицы летучей золы и частицы несгоревшего топлива. Количество образующейся в топке золы определяется зольностью топлива (A^f). Минеральная часть топлива проходит процесс озоления в высокотемпературной зоне топочной камеры. При сжигании твердого топлива часть золы проваливается через колосниковое полотно, другая оседает на поверхностях нагрева. Оставшаяся часть, обозначаемая ($a_{\text{ун}}$), выбрасывается в атмосферу через дымовую трубу (см. [26, 27]).

1.3. Экологическая характеристика промышленных печей

Промышленные печи являются источником загрязнения воздушного бассейна в первую очередь ввиду необходимости сжигания органического топлива для достижения заданных технологических параметров.

В качестве топлива для промышленных печей наряду с традиционными природным газом и мазутом часто используются отбросные газы некоторых технологических процессов: доменные, ваграночные, кокс (для коксовых и коксо-газовых вагранок). Кроме перечисленных ранее вредных веществ (CO , NO_x , SO_x и др), характерных для сжигания органических топлив, в дымовых газах промышленных печей оказываются вредные вещества, задействованные в технологических процессах или образовавшиеся в топке при высоких температурах. Например, при плавке цветных металлов выделяются дополнительно фториды (HF), цианиды (HCN), большое количество твердых частиц и др. В термических печах при плавке и отжиге выделяются дополнительно акролеин, масло и другие примеси. В процессе сушки формовочных и стержневых смесей, содержащих формальдегидные смолы, образуются и выбрасываются в воздушный бассейн формальдегид, фтористый водород и углеводороды.

Приведем примеры выбросов некоторых промышленных печей.

Литейное производство. Основными источниками загрязнения атмосферы в литейных производствах [28, 29] являются вагранки открытого типа, а также плавильные печи (доменные, кислородные, дуговые и индукционные), участки приготовления формовочных и стержневых смесей, цеха розлива металла и очистки литья.

В **доменных печах** выделяется доменный (колошниковый) газ, имеющий приблизительный состав (в % об.): CO – 30; H_2 -1,5; CH_4 – 0,5.

Вагранки служат для плавки сырого чугуна и чугуна лома. По конструкции вагранки представляют собой вертикальные шахтные печи высотой порядка 10 м и диаметром 1...2 м.

Принцип работы вагранки. Вагранка – шахтная плавильная печь непрерывного действия, в которой нагрев шихтовых материалов осуществляется в условиях противотока, когда они медленно опускаются по шахте и омываются потоком горячих газов, а плавление и перегрев жидкого металла происходит в слое раскислённого (горящего или нагретого посторонним источником) углеродосодержащего материала [31].

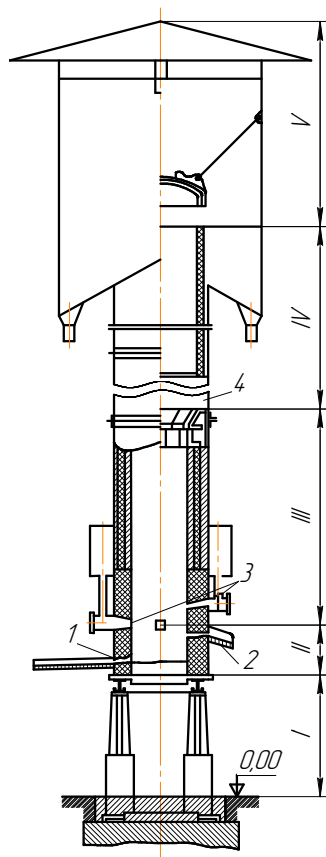


Рис. 1.5. Простейшая коксовая вагранка
I – опорная часть; II – горн; III – полезная высота; IV – труба; V – пылеуловитель; 1 – металлическая летка; 2 – шлаковая летка; 3 – фурма; 4 – загрузочное окно

Простейшая коксовая вагранка – футерованная огнеупорным материалом цилиндрическая шахта, установленная на опорной металлоконструкции и снабжённая снизу открывающимися дверцами, а сверху трубой с пылеуловителем (см. рис. 1.5). В нижней части шахты имеются каналы для выпуска металла и шлака, называемые *летками*, а несколько выше в один или несколько рядов расположены отверстия для подачи воздушного дутья, называемые *фурмами*.

На высоте 3 – 6 м (в зависимости от диаметра вагранки) выше фурм размещается окно для загрузки переплавляемых металлических материалов кокса и флюса.

Часть шахты от низа до оси фурм называют *горном*, часть от оси фурм до низа загрузочного окна – полезной высотой, а выше загрузочного окна – трубой. Труба вагранки сверху заканчивается тем или иным устройством для очистки ваграночных газов от пыли и гашения искр [31].

Газопылевые выбросы чугунолитейных вагранок. Газы, выбрасываемые в атмосферу коксовыми и коксогазовыми вагранками, содержат углекислый газ (5,2–16,2)%, оксид углерода (5,5–28,5)%, пары воды (до 12%), сернистый ангидрид (0,025–0,5)%, водород (0,7–2,7)%, кислород (0,4–4,3)% [32].

Основной вредной составляющей ваграночных газов является оксид углерода, содержание которого доходит до 170 – 240 кг на 1 т выплавляемого чугуна, что составляет в среднем 15 вес.% от количества выделяющихся колошниковых газов, которое определяется производительностью вагранки.

Таблица 1.2

Количество газов, выбрасываемых вагранками различной производительности

Диаметр вагранки, мм	Производительность вагранки, т/ч	Количество выбрасываемых газов, тыс.м ³ / ч
600	2	2-2,6
700	3	2,8-3,6
800	4	3,6-4,6
900	5	4,5-5,8
1100	7	6,9-8,6
1300	10	9,6-12
1500	15	12,8-16
1800	20	18-23
2100	25	24-30

В табл. 1.3 приведены результаты исследований характеристик ваграночных газов для вагранки производительностью 2,5 т/ч. [28]

Таблица 1.3

Характеристика выбросов вагранки производительностью 2,5 т/ч

Тип вагранки	Дымовые газы		Токсичное вещество	Концентрация, мг/м ³	Масса загрязнителей мг/м ³
	Расход, м ³ /с	Температура, °С			
Вагранка на коксе и газе производительностью 2,5 т/ч	1,32	890	СО	2200	2900
			NO _x	460	600
			SO ₂	1080	1425
			Пыль	12100	16000
	2,28	827	СО	2750	6260
			NO _x	440	1000
			SO ₂	1000	2280
			SO ₃	95	217
	1,47	660	Пыль	7900	18000
			СО	86700	128000
			NO _x	390	570
			SO ₂	680	1000
	2,03	680	SO ₂	8200	12100
			СО	2760	5620
			NO _x	380	760
			SO ₂	670	1360
		SO ₃	30	60	
		Пыль	8600	17450	

Кроме того, в отходящих ваграночных газах имеется большое содержание пыли. Количество пыли, выбрасываемой из вагранок, изменяется в пределах от 6 до 12 кг/т чугуна. Химический состав ваграночной пыли различен и зависит от состава шихты, загружаемого металла, состояния футеровки, состава топлива, условий работы вагранки.

Основными составляющими ваграночной пыли являются углерод, оксиды кремния и оксиды металлов [32]. Источником оксидов кремния является разрушающаяся футеровка вагранки и прилипающий к шихтовым материалам песок. Присутствие горючих составляющих в пыли объясняется выносом измельчённого кокса. В ваграночной пыли можно обнаружить ряд металлов, например цинка, содержание которого в отдельные периоды составляет до 59%. Отмечается наличие в ваграночных газах также свинца, обычно его концентрация составляет менее 1% в общем объёме пыли. Также в ваграночной пыли присутствует некоторое количество щелочных металлов, а также серы и фосфора.

При использовании в шихте брикетного кокса содержание углерода в ваграночной пыли растёт, содержание же оксидов кремния уменьшается (см. табл. 1.4, [32]).

Таблица 1.4

Химический состав ваграночной пыли, %

Компоненты пыли	Холодное дутьё		Горячее дутьё	
	Литейный кокс	Брикетный кокс	Литейный кокс	Брикетный кокс
Углерод (несгор.)	20-40	30-50	30-50	40-50
SiO ₂	30-50	20-40	20-40	20-30
MnO	0,1-0,5	0,1-0,3	0,1-0,3	0,1-1
Fe ₂ O ₃	3-7	2-5	3-7	4-8
Al ₂ O ₃	1-3	1-3	1-3	2-7
CaO	2-4	3-5	3-6	2-5
MgO	0,2-0,3	0,1-0,3	0,1-0,2	0,1-0,2

Доменные печи предназначены для производства сырого чугуна из железной руды и металлолома. Побочным продуктом реакции восстановления железа из руды является доменный (колошниковый) газ, имеющий

следующий приблизительный состав (в % по объему): CO - 30; H₂ - 1,5; CH₄ - 0,5; CO₂ - 13; NO_x - 0,02; остальное - азот и кислород. Кроме того, в газе могут содержаться оксиды серы, фосфора и др.

Доменный газ имеет теплоту сгорания порядка 4 МДж/м³ и может быть использован для обогрева сушил, воздухонагревателей в качестве топлива.

Удельные выделения основных загрязнителей от *печей плавки* металлов и сплавов приведены в табл. 1.5.

Таблица 1.5

Удельные выделения основных загрязнителей от печей плавки цветных металлов

Тип печи	Выделение загрязнителя, кг/т				
	пыль	NO ₂	SO ₂	CO	HF
Индукционная	1,2	0,7	0,4	0,9	0,1
Электродуговая	1,8	1,2	0,8	1,1	0,1
Печь сопротивления	1,5	0,5	0,7	0,5	0,1

В процессе сушки смесей, содержащих фенолформальдегидные, карбамидные и другие смолы, выделяются различные газообразные загрязнители, количество которых приведено в табл. 1.6 [29].

Таблица 1.6

Выделение загрязнителей при сушке формовочных и стержневых смесей, содержащих фенол-формальдегидные, карбамидные и др. смолы

	Выделение загрязнителей, кг/ч						
	CO	NO ₂	SO ₂	HF	HCHO	CH ₄	CH ₂ CHCHO
Конвейерные типа ЗИЛ	0,4	0,013	-	0,017	-	-	-
Горизонтальные конвейерные	0,5	0,25	0,14	-	0,08	0,03	0,085
Вертикальные	0,12	0,03	0,1	0,016	-	-	-
Камерные	0,65	0,001	0,1	-	-	0,033	-

Удельные выделения газообразных загрязнителей при выбивке форм и стержней ориентировочно могут быть приняты следующими: CO - 1 кг; SO₂ - 0,05 кг; NO_x - 0,2 кг; NH₃ - 0,5 кг на тонну изделий. Удельные выделения пыли зависят от типа выбивных устройств и могут быть приняты ориентировочно для подвесных вибраторов 10 кг/т, для выбивных решеток - соответственно увеличению типоразмера от 5 до 20 кг/т.

Машиностроительное производство. Крупные машиностроительные предприятия выбрасывают более 50 наименований сильно разбавленных загрязнителей количеством более 1 т/ч (без учета выбросов источников энергоснабжения). Основные источники загрязнений это топливоиспользующие установки – промышленные печи для термообработки металлов (нагрев, плавка) и сушки изделий.

Приоритетные загрязнители – вредные вещества продуктов сгорания топлива (перечисленные ранее) и образовавшиеся в процессе обработки металлов в топке токсичные примеси, выбрасываемые вместе с продуктами сгорания в атмосферу.

Ниже приведены выборочно значения удельного выброса загрязняющих веществ от оборудования термообработки металлов (см. табл. 1.7) и результаты натурных измерений содержания загрязняющих веществ в выбросах термических печей для нагрева заготовок под ковку и штамповку (см. табл. 1.8), термических печей для закалки и отжига (см. табл. 1.9), сушильных установок (см. табл. 1.10) [28, 29].

Таблица 1.7

Выделение загрязнителей от оборудования термообработки металлов

Тип оборудования, процесс	Загрязнитель		Примечания
	Наименование	Количество, г	
Печи с восстановительной атмосферой (эндогазом) - с аммиаком - с природным газом	CO	12	На 1 м ³ газа
	NO	2	- // -
	NH ₃	100	- // -
	CO	13	- // -
	NOx	2	- // -
Соляные ванны, нагрев под закалку - охлаждение и отпуск	Аэрозоли	0,35	На 1 кг металла
	HC1	0,12	- // -
	Аэрозоли	0,25	- // -
Цианирование	Аэрозоли	0,25	На 1 кг деталей
- низкотемпературное - высокотемпературное	HCN	0,3	- // -
	Аэрозоли	0,35	- // -
	HCN	0,3	- // -
Масляные ванны и баки - закалка - отпуск	Аэрозоли	0,3	- // -
	Пары масла	0,1	- // -
	- // -	0,08	- // -
Цементирование	C ₆ H ₆	2	- // -

Таблица 1.8

Выбросы термических печей для нагрева заготовок под штамповку и поковку

Тип оборудования, процесс	Топливо	Выбросы дымовых газов, м ³ /с	Загрязнитель	
			Наименование	Концентрация, мг/м ³
Печь камерная для нагрева заготовок 3 ^x тонного молота	Газ	2	CO NO _x	250 200
- нагрева заготовок для 5 ^{-ти} тонного молота	- // -	3,4	CO NO _x	100 190
- нагрева заготовок для 7 ^{-ми} тонного молота	- // -	1,65	CO NO _x	200 115
- // -	Смесь газа и мазута	2,3	Сажа CO NO _x SO ₂ SO ₃	50 115 180 600 25

Таблица 1.9

Характеристика выбросов термических камерных печей для закалки и отжига

Тип оборудования, процесс	Выброс дымовых газов, м ³ /с	Загрязнитель	
		Наименование	Концентрация, мг/м ³
Печь термическая камерная закалочная	0,53	CO NO _x Акролеин Масло	210 140 70 40
- для отжига на газе	3,06	CO NO _x	300 160
- для отжига на газе и мазуте	0,375	CO NO _x SO ₂ SO ₃	1000 210 475 20
- для пуска на газе	2,15	CO NO _x Акролеин Масло	115 150 6 25

Инженерные методы расчета концентраций вредных веществ в выбросах промышленных печей основаны на использовании эмпирических зависимостей, полученных на основании испытаний однотипных агрегатов в производственных условиях. Результаты многочисленных испытаний сведены в ведомственные методики, а затем на их базе разработаны нормативы [14] выбросов вредных веществ различными технологическими процессами.

Таблица 1.10

Характеристика выбросов установок для сушки форм, стержней, песка и глины

Тип сушила	Топливо	Выброс дымовых газов, м ³ /с	Загрязнитель		
			Наименование	Концентрация, мг/м ³	Выброс, мг/с
Двухкамерное горизонтальное для форм и стержней	Газ	2,95	СО NO, Акролеин Бензин	1200 150 730 16400	3540 450 2200 48500
	- // -	0,25	СО NO Акролеин Бензин	920 240 500 7500	230 60 125 1875
Вертикальное для форм и стержней	- // -	0,5	СО NO, Акролеин	1200 230 730	600 115 365
	- // -	0,15	Бензин СО NO Акролеин Бензин	16000 200 240 100 10000	8000 30 35 15 1500
Туннельное для форм и стержней	Мазут	3,57	Сажа СО NO SO ₂ SO ₃	40 2000 150 840 35	145 7150 570 3000 120

1.4. Экологическая характеристика выбросов котельных установок на органическом топливе

1.4.1. Концентрации вредных веществ в продуктах сгорания котлов

Содержание загрязняющих веществ в продуктах сгорания промышленных и отопительных котлов зависит от вида сжигаемого топлива, способа сжигания, мощности котлов, типа и количества топливосжигающих устройств. При эксплуатации котлов для оценки концентраций вредных веществ в продуктах сгорания используются инструментальные методы.

В табл. 1.11 выборочно представлены результаты замеров концентраций загрязняющих веществ в дымовых газах промышленных и отопительных котлов при $\alpha_T = 1,10$, приведенных в [28, 30].

Таблица 1.11

Концентрация NO_x для паровых котлов малой мощности на газовом топливе

Тип котла и производительность, т/ч	Тип и количество горелок	Концентрация NO_{x_3} мг/м ³
Жаротрубные (2), топка не футерована	Инжекционная многофакельная (2)	120
ДКВР-2,5-13	Вертикально-щелевая (4)	130
Жаротрубные (2,5) топка футерована по длине	Инжекционная многофакельная (2)	138
ДКВР-4-13	БИГ-ОП-14 (4)	140
ДКВР-4-13	Вертикально-щелевая (4)	145
ДКВР-6,5-13	БИГ-ПП-24 (4)	152
ДКВР>6,5-13	БИГ-ОП-18 (4)	162
ДКВР-6,5-13	ГА-106 (2)	160
ДКВР-10-13	Подовые (3)	150
Жаротрубные (2,5), топка не футерована	ГА-1228-00 (2)	168
ДКВР-10-13	ГА-110 (2)	170
ДКВР-6,5-13	Вертикально-щелевая (4)	170
ДКВР-6,5-13	НГМГ-4 (2)	180

Таблица 1.12

Концентрации NO_x , SO_x , CO и сажи на выходе из паровых котлов малой мощности при сжигании мазута

Тип котла	D_k т/ч	P_k Мпа	Мазут		Концентрации, мг/м ³			
			Марка	S^r , %	NO_x	SO_x	CO	Сажи
ДКВР-2,5-13	2,5	1,1	М-100	3,4	140	3900	200	60
ДКВР-4-13	4,0	0,8	М-100	0,8	150	1070	120	50
Жаротрубный	3,5	0,6	М-40	0,5	200	680	175	90
ДКВР-4-13	5,5	0,8	М-100	0,9	220	1240	130	95
ДКВР-6,5-13	8,0	0,8	М-100	1,4	250	1650	200	65
ДКВР-10-13	10	1,1	М-100	0,95	280	1250	25	75
ДКВР-10-13,	10	1,0	М-100	0,95	230	1250	60	70
ГМ-10-13-250	10	1,3	М-40	0,50	490	750	10	55

Таблица 1.13

Концентрация NO_x на выходе из топок паровых котлов средней мощности производительностью 20-120 т/ч на газовом топливе

Тип котла	Тип и количество горелок	a_T	Концентрация, NO_x , мг/м ³
ДКВР-20-13	ГМГ-5,5/7 (2)	1,11	165
ДКВР-20-13	ГМГ-7М (2)	1,11	210
ДКВР-20-13	ГМГБ-5,6 (2)	1,11	230
БКЗ-50-39ГМ	Газомазутная (3)	1,09	280

Таблица 1.14

Концентрации NO_x и SO_x на выходе из котлов ПТВМ при сжигании газа и мазута марки100

Тип котла	Марка	Содержание серы в мазуте, %	Концентрации, мг/м ³		
			На мазуте		На газе
			NO_x	SO_x	NO_x
ПТВМ-50	М-100	1,1	1450	300	280
ПТВМ-100	М-100	1,5	2200	320	300
ПТВМ-100	М-100	1,3	1980	350	-
ПТВМ-180	М-100	1,7	2550	460	-

Таблица 1.15

Концентрации NO_x , SO_x , CO и золы в дымовых газах котлов при различных методах сжигания твердых топлив

Тип котла	Д _к	Р _к , МПа	Тем-ра ПП °С	Тип топки	Вид топлива	Концентрации, мг/м ³			
						NO_x	SO_x	CO	зола
Чугунные секционные (3350 МДж)	-	-	-	Колосниковая ручная	Каменный уголь, антрацит	90-120	500-600	600-1200	2000-2200
ДКВ-6,5 ДКВР-6,5	6,5	1,0	-	ПМЗ-РПК	То же	200-300	500-600	500-800	1500-1600
ДКВ-10, ДКВР-10; 20; ТС-20	10-20; 20; 20	1,3-2,4	250	Механическая цепная слоевая	-	350-450	500-600	100-150	1400-1600
ТП-170 ТП-230-2 ПК-10	150-230	10,0-7	510	Камерная с жидким шлако-золоудалением	Бурые и каменные угли	600-1500	500-600	-	700-800
ТП-170	150	10,0	5-10	То же	Фрезерный торф	500-600	140		-

Анализ данных, представленных в табл. 1.8–1.15, позволяет сделать следующие выводы [28]:

– содержание оксидов азота в продуктах сгорания природного газа, мазута, каменных, бурых углей и антрацита при одинаковых принципах сжигания увеличивается с ростом мощности котлов;

– концентрации оксидов азота в продуктах сгорания котлов одинаковой тепловой мощности в зависимости от вида сжигаемого топлива

располагаются в следующем порядке: минимальные значения при использовании газообразного топлива и максимальные значения при использовании твёрдых топлив;

– для котлов одного типа при сжигании природного газа концентрации NO_x заметно различаются в зависимости от метода переоборудования топочного устройства и типа установленных горелочных устройств: наименьшее содержание NO_x отмечается для топок с большим числом горелок, отличающихся меньшей тепловой мощностью и более рассредоточенным пламенем и, наоборот, наибольшая концентрация NO_x наблюдается у камерных топок, имеющих минимальное число горелок (1, 2) с большей единичной мощностью, и сосредоточенным пламенем;

– способ распыливания мазута также влияет на концентрацию NO_x : при паровом распыливании жидкого топлива концентрация NO_x на 15-20% меньше, чем в случаях механического распыливания;

– концентрации оксидов серы зависят от содержания серы S^r в топливе: при сжигании малосернистых мазутов ($S^r_{л} < 0,5\%$) концентрация SO_x составляет (680-750) мг/м^3 , сернистых ($S^r = 0,6-1,4\%$) мазутов (800-1980) мг/м^3 , высокосернистых ($S^r_{л} = 1,5-3,5\%$) мазутов (2200-4170) мг/м^3 ;

– концентрация оксида углерода CO в продуктах сгорания мазута в большинстве случаев выше у котлов малой мощности по сравнению с котлами средней мощности находится в пределах от 10 до 200 мг/м^3 ;

- концентрация сажи в продуктах сгорания мазута, также как и оксид углерода CO , зависит от полноты сгорания топлива и составляет (50-150) мг/м^3 ;

– концентрация золы определяется зольностью твердого топлива и значением величины уноса: при сжигании каменных углей и антрацитов в слоевых топках чугунных секционных котлов при ручном обслуживании топок без очистки уходящих газов равна (2000-2200) мг/м^3 , в котлах ДКВ и ДКВР с полумеханическими (ПМЗ-РПК) и механическими цепными решетками – (1400-1600) мг/м^3 .

1.4.2. Расчет массы загрязняющих веществ в выбросах котельной

При проектировании котельных установок расчет массы загрязняющих веществ проводится в соответствии с «Методикой определения выбросов загрязняющих веществ в атмосферу при сжигании топлива в котлах производительностью менее 30 тонн пара в час или менее 20 Гкал в час» [5].

Методика предназначена для расчета выбросов вредных веществ с газообразными продуктами сгорания при сжигании природного газа, мазута и твердого топлива в топках промышленных и коммунальных котлоагрегатов.

Ниже приведены формулы для расчета выбросов вредных веществ при **сжигании природного газа и мазута** в котлах, оснащенных газомазутными горелками.

Расчет массы токсичных веществ (NO_x , CO, SO_2 , твердых частиц, бенз(а)пирена) производится для двух временных промежутков: годовой (валовой) выброс веществ, т/год (необходим для подсчета ущерба от загрязнения) и секундный выброс загрязняющих веществ, г/с (необходим для расчета рассеивания токсичных веществ в атмосфере).

Расчет массы оксида углерода

Масса выбросов оксида углерода, г/с (т/год) определяется по формулам:

при сжигании мазута:

$$M_{\text{CO}} = 10^{-3} B \cdot C_{\text{CO}} \cdot (1 - q_4/100), \quad (1.27)$$

где B - расход топлива котельной установкой для расчетного периода, г/с (т/год); C_{CO} - количество оксида углерода при сжигании топлива, г/кг или кг/т; q_4 - потери теплоты вследствие механической неполноты сгорания топлива, %.

при сжигании природного газа в соответствии с [7]:

- при определении максимальных выбросов, г/с:

$$M_{\text{CO}} = B \cdot C_{\text{CO}} \quad (1.28)$$

где B - расход топлива, м³/с; C_{CO} имеет размерность [г/м³].

- при определении валовых выбросов, т/год:

$$M_{\text{CO}} = 10^{-3} B \cdot C_{\text{CO}}, \quad (1.29)$$

где B - расход топлива, тыс.м³/год; C_{CO} - имеет размерность [кг/тыс. м³].

Количество оксида углерода C_{CO} , г/кг (г/м³) или кг/т (кг/тыс.м³) рассчитывается по формуле:

$$C_{\text{CO}} = q_3 \cdot R \cdot Q_i^f, \quad (1.30)$$

где q_3 - потери теплоты вследствие химической неполноты сгорания топлива, %;

R - коэффициент, учитывающий долю потери теплоты вследствие химической неполноты сгорания, обусловленную наличием в продуктах сгорания оксида углерода. Принимается для мазута $R = 0,65$; природного газа $R = 0,5$; Q_i^r - низшая теплота сгорания топлива, МДж/кг (МДж/м³).

При отсутствии эксплуатационных данных значения q_3, q_4 рекомендуется принять в соответствии с [5, табл. В1, прил. В]: при сжигании природного газа: $q_3 = 0,2\%$, $q_4 = 0\%$; при сжигании мазута: $q_3 = 0,2\%$, $q_4 = 0,1\%$.

Расчет массы оксидов азота

Суммарное количество оксидов азота (в пересчете на NO_2), выбрасываемых в атмосферу с дымовыми газами, г/с (т/год), рассчитывается по формулам:

при сжигании природного газа:

$$M_{\text{NO}_x} = B_p \cdot Q_i^r \cdot K_{\text{NO}_2}^r \cdot \beta_k \cdot \beta_t \cdot \beta_\alpha \cdot (1 - \beta_r) \cdot (1 - \beta_\delta) \cdot k_n, \quad (1.31)$$

где B_p - расчетный расход топлива, м³/с (тыс. м³/год). При работе котла в соответствии с режимной картой с достаточной степенью точности может быть принято $B_p = B$ - фактическому расходу топлива на котел; Q_i^r - низшая теплота сгорания топлива, МДж/м³; $K_{\text{NO}_2}^r$ - удельный выброс оксидов азота при сжигании газа, г/МДж; β_k - безразмерный коэффициент, учитывающий принципиальную конструкцию горелки; β_t - безразмерный коэффициент, учитывающий температуру воздуха, подаваемого для горения; β_α - безразмерный коэффициент, учитывающий влияние избытка воздуха на образование оксидов азота; β_r - безразмерный коэффициент, учитывающий влияние рециркуляции дымовых газов через горелки на образование оксидов азота; β_δ - безразмерный коэффициент, учитывающий ступенчатый ввод воздуха в топочную камеру; k_n - коэффициент пересчета. При определении выбросов в граммах в секунду $k_n = 1$; при определении выбросов в тоннах в год $k_n = 10^{-3}$.

Удельный выброс оксидов азота, г/МДж определяется по формулам:

- для паровых котлов:

$$K_{\text{NO}_2}^r = 0,01 \cdot \sqrt{D} + 0,03, \quad (1.32)$$

где D - фактическая паропроизводительность котла, т/ч.

- для водогрейных котлов:

$$K_{\text{NO}_2}^r = 0,0113 \cdot \sqrt{Q_T} + 0,03, \quad (1.33)$$

где Q_T - фактическая тепловая мощность котла, МВт.

Коэффициент β_k для всех дутьевых горелок напорного типа (т.е. при наличии дутьевого вентилятора на котле) принимается $\beta_k = 1,0$; для горелок инжекционного типа принимается $\beta_k = 1,6$; для горелок двухступенчатого сжигания (ГДС) $\beta_k = 0,7$.

Коэффициент β_t рассчитывается по формуле:

$$\beta_t = 1 + 0,002 \cdot (t_{\text{гв}} - 30), \quad (1.34)$$

где $t_{\text{гв}}$ - температура горячего воздуха, °С.

Коэффициент β_α в общем случае принимается $\beta_\alpha = 1,225$, при работе котла в соответствии с режимной картой $\beta_\alpha = 1$.

Коэффициент β_r при подаче газов рециркуляции в смеси с воздухом рассчитывается по формуле:

$$\beta_r = 0,16\sqrt{r}, \quad (1.35)$$

где r - степень рециркуляции дымовых газов, %.

Коэффициент β_δ , определяется по формуле:

$$\beta_\delta = 0,022 \delta, \quad (1.36)$$

где δ - доля воздуха, подаваемого непосредственно в топочную камеру (в процентах от общего количества организованного воздуха).

при сжигании мазута, г/с (т/год):

$$M_{NO_x} = B_p \cdot Q_i^r \cdot K_{NO_2}^m \cdot \beta_t \cdot \beta_\alpha \cdot (1 - \beta_r) \cdot (1 - \beta_\delta) \cdot k_n, \quad (1.37)$$

где B_p - расчётный расход топлива, кг/с (т/год); Q_i^r - низшая теплота сгорания топлива, МДж/кг; $K_{NO_2}^m$ - удельный выброс оксидов азота при сжигании мазута, г/МДж; β_t - безразмерный коэффициент, учитывающий температуру воздуха, подаваемого для горения; определяется по формуле (1.34); β_α - безразмерный коэффициент, учитывающий влияние избытка воздуха на образование оксидов азота при сжигании мазута; β_r - безразмерный коэффициент, учитывающий влияние рециркуляции дымовых газов через горелки на образование оксидов азота; β_δ - безразмерный коэффициент, учитывающий ступенчатый ввод воздуха в топочную камеру; k_n - коэффициент пересчета. При определении выбросов в граммах в секунду $k_n = 1$; при определении выбросов в тоннах в год $k_n = 10^{-3}$.

Расчётный расход топлива при сжигании мазута, кг/с (т/год) определяется по формуле:

$$B_p = B(1 - q_4/100), \quad (1.38)$$

где B - фактический расход топлива на котел, кг/с (т/год); q_4 - потери теплоты от механической неполноты сгорания, %.

Удельный выброс оксидов азота, г/МДж определяется по формулам:

– для паровых котлов:

$$K_{NO_2}^m = 0,01 \cdot \sqrt{D} + 0,1, \quad (1.39)$$

где D - фактическая паропроизводительность котла, т/ч.

– для водогрейных котлов:

$$K_{NO_2}^m = 0,0113 \cdot \sqrt{Q_m} + 0,1, \quad (1.40)$$

где Q_m - фактическая тепловая мощность котла, МВт.

Коэффициент β_α в общем случае принимается $\beta_\alpha = 1,113$; при работе котла в соответствии с режимной картой $\beta_\alpha = 1$. Коэффициент β_r при подаче газов рециркуляции в смеси с воздухом рассчитывается по формуле:

$$\beta_r = 0,17\sqrt{r}, \quad (1.41)$$

где r - степень рециркуляции дымовых газов, %.

Коэффициент β_δ рассчитывается по формуле:

$$\beta_\delta = 0,018 \delta, \quad (1.42)$$

где δ - доля воздуха, подаваемого непосредственно в топочную камеру (в процентах от общего количества организованного воздуха).

При определении максимальных выбросов оксидов азота в граммах в секунду по формулам (1.31) и (1.37) значения входящих в формулу величин определяются при максимальной тепловой мощности котла.

При определении валовых выбросов оксидов азота за год значения входящих в формулу (1.31) и (1.37) величин определяются по средней за рассматриваемый промежуток времени нагрузке котла.

В связи с установленными отдельными ПДК для оксида и диоксида азота и с

учетом трансформации оксида азота в атмосферном воздухе суммарные выбросы оксидов азота, г/с (т/год) разделяются составляющие (с учетом различия в молекулярной массе этих веществ):

$$M_{NO_2} = 0,8 \cdot M_{NO_x}, \quad (1.43)$$

$$M_{NO} = 0,13 \cdot M_{NO_x}, \quad (1.44)$$

Расчет массы оксидов серы

Суммарное количество оксидов серы, выбрасываемых атмосфере с дымовыми газами при сжигании мазута, г/с (т/год) рассчитывается по формуле:

$$M_{SO_2} = 0,02 \cdot B_p \cdot S^r \cdot (1 - \eta'_{SO_2}) \cdot (1 - \eta''_{SO_2}), \quad (1.45)$$

где B_p – расчётный расход топлива за рассматриваемый период, г/с (т/год); S^r – содержание серы в топливе на рабочую массу, %; η'_{SO_2} – доля оксидов серы, связываемых летучей золой в котле; η''_{SO_2} – доля оксидов серы, улавливаемых в мокром золоуловителе попутно с улавливанием твердых частиц.

Ориентировочные значения η'_{SO_2} при сжигании мазута – 0,02; газа – 0.

Доля оксидов серы η''_{SO_2} принимается: для сухих золоуловителей равной нулю; для мокрых золоуловителей η''_{SO_2} зависит от общей щелочности орошающей воды и приведенной сернистости топлива S^{np} , (% · кг)/МДж.

$$S^{np} = S^r / Q_i^r, \quad (1.46)$$

При характерных для эксплуатации удельных расходах воды на орошение золоуловителей 0,1 – 0,15 дм³/м³ η''_{SO_2} определяется по рис. 1.6.

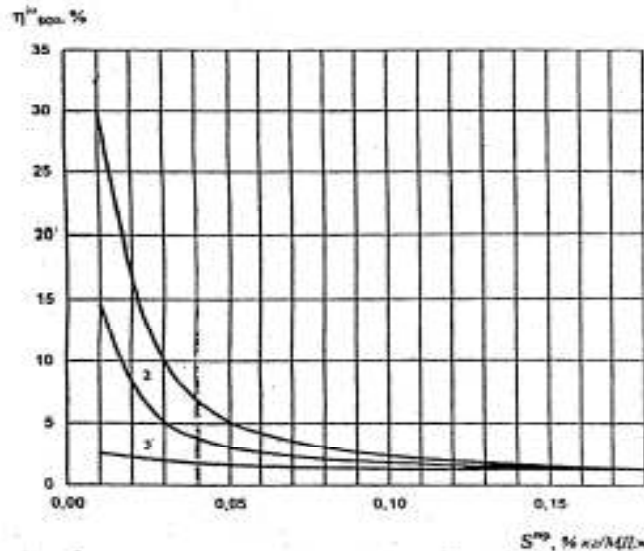


Рис. 1.6. Определение доли оксидов серы η''_{SO_2} , улавливаемых в мокром золоуловителе.

Щёлочность орошающей воды, мг-экв/дм³: 1 - 10; 2 - 5; 3 - 0

Расчет массы твёрдых частиц

При сжигании мазута твёрдые частицы выделяются в виде золы и сажи. Мазутная зола представляет собой сложную смесь, состоящую в основном из оксидов металлов.

В качестве контролирующего показателя принят ванадий, по содержанию которого в золе установлен санитарно-гигиенический норматив ПДК (см. прил. А).

Суммарное количество **мазутной золы ($M_{мз}$) в пересчете на ванадий**, г/с (т/год) поступающей в атмосферу с дымовыми газами котла при сжигании мазута, вычисляют по формуле:

$$M_{мз} = G_v \cdot B \cdot (1 - \eta_{ос}) \cdot (1 - \eta_{зв}^v / 100) \cdot k_{п}, \quad (1.47)$$

где G_v - количество ванадия, находящегося в 1 т мазута, г/т; B - расход натурального топлива. При определении выбросов в г/с B берется в т/ч; при определении выбросов в т/год B берется в т/год; $\eta_{ос}$ - доля ванадия, оседающего с твердыми частицами на поверхности нагрева мазутных котлов, которую принимают равной: 0,07 - для котлов с пароперегревателями, очистка поверхностей которых производится в остановленном состоянии; 0,05 - для котлов без пароперегревателей при тех же условиях очистки; $\eta_{зв}^v$ - степень очистки дымовых газов от мазутной золы в золоулавливающих установках, % [5, прил. Д]; $k_{п}$ - коэффициент пересчета: при определении выбросов в г/с $k_{п} = 0,278 \cdot 10^{-3}$; при определении выбросов в т/год $k_{п} = 10^{-6}$.

Количество ванадия на 1 т мазута G_v , г/т может быть определено по результатам химического анализа мазута, либо при отсутствии данных химического анализа по приближенной формуле:

$$G_v = 2222 \cdot A^r, \quad (1.48)$$

где 2222 - эмпирический коэффициент; A^r - содержание золы в мазуте на рабочую массу, %. При отсутствии данных химического анализа значения A^r принимаются по данным [5, табл. Г1, прил. Г].

Степень очистки газов от мазутной золы (в пересчете на ванадий), $\eta_{зв}^v$, % в специально применяемых для этого батарейных циклонах при выполнении условия $65 \% < \eta_{зв.общ} < 85 \%$ определяют по формуле:

$$\eta_{зв}^v = 0,076 (\eta_{зв.общ})^{1,85} - 2,32 \eta_{зв.общ}, \quad (1.49)$$

где 0,076 и 2,32 - эмпирические коэффициенты; 1,85 - эмпирический показатель степени; $\eta_{зв.общ}$ - общая степень улавливания твердых частиц, образующихся при сжигании мазута в котельных, %.

Количество **сажи** при сжигании мазута, г/с (т/год) определяют по формуле:

$$M_c = 0,01 \cdot B \cdot a_{ун} A^r \cdot (1 - \eta_3), \quad (1.50)$$

где B - расход топлива, г/с (т/год); A^r - зольность топлива на рабочую массу, %; $a_{ун}$ - доля золы топлива в уносе; при отсутствии данных замеров можно использовать ориентировочные значения, приведенные в [27]; η_3 - доля твердых частиц, улавливаемых в золоуловителях. При определении максимальных выбросов в г/с используются максимальные значения A^r фактически использованного топлива. При определении валовых выбросов в т/год используются среднегодовые значения A^r .

Расчет массы бенз(а)пирена

Суммарное количество бенз(а)пирена, поступающего в атмосферу с дымовыми газами, г/с (т/год) определяется по формуле:

$$M_{бп} = c'_{бп} \cdot V_{сг} \cdot B_p \cdot k_{п}, \quad (1.51)$$

где $c'_{бп}$ - массовая концентрация бенз(а)пирена в сухих дымовых газах при стандартном коэффициенте избытка воздуха $\alpha_0 = 1,4$ и нормальных условиях (температура 273 К и давление 101,3 кПа), мг/м³; $V_{сг}$ - объем сухих дымовых газов, образующихся при полном сгорании 1 кг (1 м³) топлива при $\alpha_0 = 1,4$, м³/кг топлива (м³/м³ топлива); B_p - расчетный

расход топлива. При определении выбросов в граммах в секунду B_p берется в т/ч (тыс. $\text{м}^3/\text{ч}$); при определении выбросов в тоннах в год B_p берется в т/год (тыс. $\text{м}^3/\text{год}$). $k_{\text{п}}$ - коэффициент пересчета; при определении выбросов в граммах в секунду $k_{\text{п}} = 0,278 \cdot 10^{-3}$; при определении выбросов в тоннах в год $k_{\text{п}} = 10^{-6}$.

Расчётный расход топлива при сжигании газа с достаточной степенью точности может быть принят $B_p = B$ - фактическому расходу топлива на котёл при работе котла в соответствии с режимной картой. При сжигании мазута расчётный расход определяется по формуле (1.38).

Объём сухих дымовых газов, $\text{м}^3/\text{кг}$ ($\text{м}^3/\text{м}^3$) определяется по формуле:

$$V_{\text{сг}} = V_{\text{г}}^0 + (\alpha - 1) \cdot V_{\text{в}}^0 - V_{\text{H}_2\text{O}}^0, \quad (1.52)$$

где V^0 , $V_{\text{г}}^0$ и $V_{\text{H}_2\text{O}}^0$ - соответственно объёмы воздуха, дымовых газов и водяных паров при стехиометрическом сжигании одного килограмма (1 нм^3) топлива, $\text{м}^3/\text{кг}$ ($\text{м}^3/\text{м}^3$). Принимаются по нормативному методу [27] по химическому составу сжигаемого топлива или табличным данным [5, прил. 3, табл. 32, табл. 33]; $\alpha = 1,4$ - стандартный коэффициент избытка воздуха.

Для расчета максимальных и валовых выбросов бенз(а)пирена по формуле (1.51) концентрации бенз(а)пирена вначале рассчитываются по формулам (1.53)-(1.56) для паровых котлов малой мощности (или по формулам (1.58)-(1.61) для водогрейных котлов малой мощности), а затем приводятся к избыткам воздуха $\alpha = 1,4$ по формуле (1.62).

Расчёт концентрации бенз(а)пирена в дымовых газах паровых котлов малой мощности

При сжигании мазута концентрация бенз(а)пирена, $\text{мг}/\text{м}^3$ в сухих продуктах сгорания на выходе из топочной камеры паровых котлов определяется по формулам:

- для $\alpha''_{\text{T}} = 1,08 \div 1,25$:

$$c_{\text{бп}}^{\text{м}} = 10^{-3} \cdot \frac{R \cdot (0,34 + 0,42 \cdot 10^{-3} q_{\text{в}})}{e^{3,8 \cdot (\alpha''_{\text{T}} - 1)}} K_{\text{д}} K_{\text{п}} K_{\text{сг}}, \quad (1.53)$$

- для $\alpha''_{\text{T}} > 1,25$:

$$c_{\text{бп}}^{\text{м}} = 10^{-3} \cdot \frac{R \cdot (0,172 + 0,23 \cdot 10^{-3} q_{\text{в}})}{e^{1,14 \cdot (\alpha''_{\text{T}} - 1)}} K_{\text{д}} K_{\text{п}} K_{\text{сг}}, \quad (1.54)$$

При сжигании природного газа концентрация бенз(а)пирена, $\text{мг}/\text{м}^3$ в сухих продуктах сгорания на выходе из топочной камеры паровых котлов определяется по формулам:

- при $\alpha''_{\text{T}} = 1,08 \div 1,25$:

$$c_{\text{бп}}^{\text{г}} = 10^{-3} \cdot \frac{0,059 + 0,079 \cdot 10^{-3} q_{\text{в}}}{e^{3,8 \cdot (\alpha''_{\text{T}} - 1)}} K_{\text{д}} K_{\text{п}} K_{\text{сг}}, \quad (1.55)$$

- при $\alpha''_{\text{T}} > 1,25$:

$$c_{\text{бп}}^{\text{г}} = 10^{-3} \cdot \frac{0,032 + 0,043 \cdot 10^{-3} q_{\text{в}}}{e^{1,14 \cdot (\alpha''_{\text{T}} - 1)}} K_{\text{д}} K_{\text{п}} K_{\text{сг}}, \quad (1.56)$$

В формулах (1.53)-(1.56):

R - коэффициент, учитывающий способ распыливания мазута для паромеханических форсунок $R = 0,75$; для остальных случаев $R = 1$; α''_{T} - коэффициент избытка воздуха в продуктах сгорания на выходе из топки; $q_{\text{в}}$ - теплонпряжение топочного объема, $\text{кВт}/\text{м}^3$; $K_{\text{д}}$ - коэффициент, учитывающий влияние нагрузки котла на концентрацию бенз(а)пирена в продуктах сгорания, (определяется по [5, рис. Е1 прил. Е]); $K_{\text{п}}$ - коэффициент, учитывающий влияние рециркуляции дымовых газов на концентрацию бенз(а)пирена

в продуктах сгорания, (определяется по [5, рис. Е2 прил. Е]); $K_{ст}$ - коэффициент, учитывающий влияние ступенчатого сжигания на концентрацию бенз(а)пирена в продуктах сгорания, (определяется по [5, рис. Е3 прил. Е]). Также коэффициенты K_d , K_p и $K_{ст}$ можно определить по прил. Б данного пособия.

Величина q_v , кВт/м³ берется из технической документации на котёл, либо рассчитывается по соотношению:

$$q_v = B_p Q_i^r / V_T, \quad (1.57)$$

где $B_p = B(1 - q_4/100)$ - расчетный расход топлива на номинальной нагрузке, кг/с (м³/с); B - фактический расход топлива на номинальной нагрузке, кг/с (м³/с); Q_i^r - низшая теплота сгорания топлива, кДж/кг (кДж/м³); V_T - объем топочной камеры, м³; берется из технической документации на котёл.

Расчет концентрации бенз(а)пирена в дымовых газах водогрейных котлов

При сжигании мазута концентрация бенз(а)пирена, мг/м³ в сухих продуктах сгорания на выходе из топочной камеры водогрейных котлов определяется по формулам:

- для $\alpha''_T = 1,05 \div 1,25$ и $q_v = 250 \div 500$ кВт/м³:

$$c_{\text{бп}}^m = 10^{-6} \cdot \frac{R \cdot (0,445q_v - 28,0)}{e^{3,5 \cdot (\alpha''_T - 1)}} K_d K_p K_{ст} K_o, \quad (1.58)$$

- для $\alpha''_T > 1,25$ и $q_v = 250 \div 500$ кВт/м³:

$$c_{\text{бп}}^m = 10^{-6} \cdot \frac{R \cdot (0,52q_v - 32,5)}{1,16 \cdot e^{3,5 \cdot (\alpha''_T - 1)}} K_d K_p K_{ст} K_o, \quad (1.59)$$

При сжигании природного газа концентрация бенз(а)пирена, мг/м³, в сухих продуктах сгорания на выходе из топочной камеры водогрейных котлов малой мощности определяется по формулам:

- для $\alpha''_T = 1,05 \div 1,25$ и $q_v = 250 \div 500$ кВт/м³:

$$c_{\text{бп}}^r = 10^{-6} \cdot \frac{0,11q_v - 7,0}{e^{3,5 \cdot (\alpha''_T - 1)}} K_d K_p K_{ст}, \quad (1.60)$$

- для $\alpha''_T > 1,25$ и $q_v = 250 \div 500$ кВт/м³:

$$c_{\text{бп}}^r = 10^{-6} \cdot \frac{0,13q_v - 5,0}{1,3 \cdot e^{3,5 \cdot (\alpha''_T - 1)}} K_d K_p K_{ст}, \quad (1.61)$$

В формулах (1.58)-(1.61) обозначения те же, что и в формулах (1.53)-(1.56); коэффициенты K_d , K_p , $K_{ст}$ принимаются по [5, прил. Е]). Также коэффициенты K_d , K_p и $K_{ст}$ можно определить по прил. Б данного пособия.

Коэффициент K_o , учитывающий влияние дробевой очистки конвективных поверхностей нагрева на работающем котле, принимается:

при периоде между очистками 12 ч	1,5
при периоде между очистками 24 ч	2,0
при периоде между очистками 48 ч	2,5

В итоге массовая концентрация бенз(а)пирена при стандартном коэффициенте избытка воздуха $\alpha_0 = 1,4$ вычисляется по формуле:

$$c'_{\text{бп}} = c_{\text{бп}} \cdot \frac{\alpha''_T}{\alpha_0}, \text{ мг/м}^3 \quad (1.62)$$

где α''_T - коэффициент избытка воздуха на выходе из топочной камеры.

1.5. Топливная промышленность как источник загрязнения воздушного бассейна

Процессы добычи, переработки и транспортировки органических топлив являются существенным источником загрязнения воздушного бассейна. К тому же использование органических топлив в мире стремительно возрастает. Проследим динамику добычи топлив: в 1970 г. мире добыто 6,6 млрд. тонн условного топлива (т у. т.), в 1980 г. - 10, а в 2000 г. - 20 млрд. т.у.т (в т.ч. ядерного).

Увеличение добычи топлив приводит к негативному воздействию на все компоненты окружающей среды - вызывает нарушение почвенного покрова, режима подземных вод, гибель растительного покрова, загрязнение воздушного и водного бассейнов.

1.5.1. Газовая и нефтяная отрасли промышленности

Нефтяная и газовая отрасли топливной промышленности потенциально опасны по воздействию на все компоненты окружающей среды (недра, почва, вода, воздух, флора, фауна).

Это обусловлено токсичностью природных углеводородов и их спутников, большим разнообразием химических веществ, используемых в технологических процессах и возрастающим объемом добычи газа и нефти [34].

Залежи нефти и газа представляют собой скопление углеводородов, т.е. заполняют поры проницаемых пород [35]. Пористой структурой обладают песчаники, пористые известняки и доломиты. Большинство месторождений представляют собой складки земной коры, обращенные выпуклостью вверх «купола» (см. рис. 1.7).

Газонефтеносные пласты залегают между газонепроницаемыми породами (глина, плотные известняки, мергели). Чаще всего месторождения бывают многопластовыми. Чем глубже залегают пласты, тем выше давление в пласте.

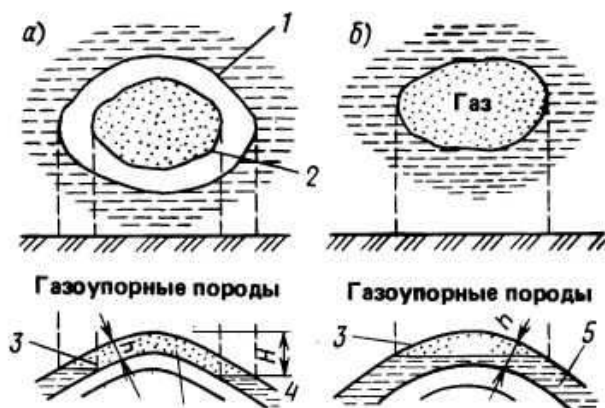


Рис. 1.7. Залегание газа и нефти: 1-газ; 2 – нефть или пластовая вода;
3 – газопроницаемые породы

Источниками загрязнения являются все основные технологические процессы в нефтяной и газовой отраслях промышленности: разведка, бурение, сбор, транспортировка, хранение, переработка, а также использование нефти и газа.

Нефть, нефтяной и буровой шламы, газообразные углеводороды, пластовые и сточные воды проникают в окружающую среду при: бурении и аварийном фонтанировании нефтяных и газовых скважин; аварии транспортных средств, разрывах нефтепроводов и газопроводов; при нарушении герметичности колонн в скважинах и технологического оборудования; при сбросе неочищенных промысловых вод в поверхностные водоемы и водотоки. Рассмотрим подробнее эти источники.

1.5.2. Добыча газа и нефти

Схема сооружений магистрального газопровода приведена на рис. 1.8. Головным сооружением магистрального газопровода является промысел. Основным элементом промысла является скважина (см. рис. 1.9).

Бурят скважину быстровращающимся буром, а по фонтанным трубам нагнетают буровой раствор. Эксплуатационную колонну опускают в продуктивный слой. Добычу газа ведут по фонтанным трубам.

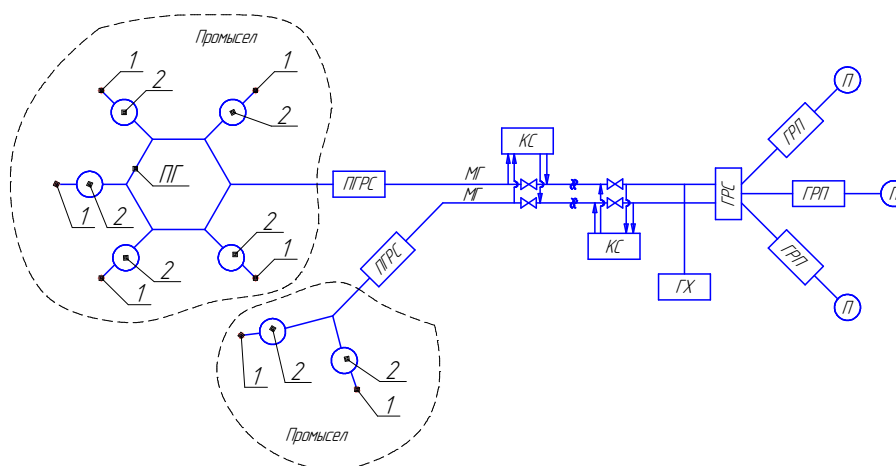


Рис. 1.8. Схема сооружений магистрального газопровода: 1 - скважина; 2 – сепаратор; ПГ – промышленный газопровод; ПГРС – промысловая газораспределительная станция; КС – компрессорная станция; ГХ – газовое хранилище; ГРС – газораспределительная станция; ГРП - газораспределительный пункт; П – потребитель газа.

Сеть газовых скважин объединяется промышленным газопроводом и природный газ подается на ПГРС – промысловую газораспределительную станцию. Здесь осуществляется **обработка** газа перед подачей в систему магистральных газопроводов.

Обработка газа заключается в очистке от вредных примесей (диоксид углерода, сероводород), осушке и одоризации.

Для осушки газа используются токсичные диэтиленгликоль и триэтиленгликоль. Для одоризации газа – меркаптаны, в том числе –

токсичный этилмеркаптан (C_2H_5SH)- имеющий резкий и неприятный запах. Кроме того природный газ многих месторождений содержит токсичный и агрессивный сероводород (H_2S). Концентрация (H_2S) в месторождениях Оренбургском, Муберакском и Астраханском составляет (%): 1,5 – 4,5; 6 и 30 соответственно.

При обработке газа с содержанием H_2S около 3% на рабочих местах

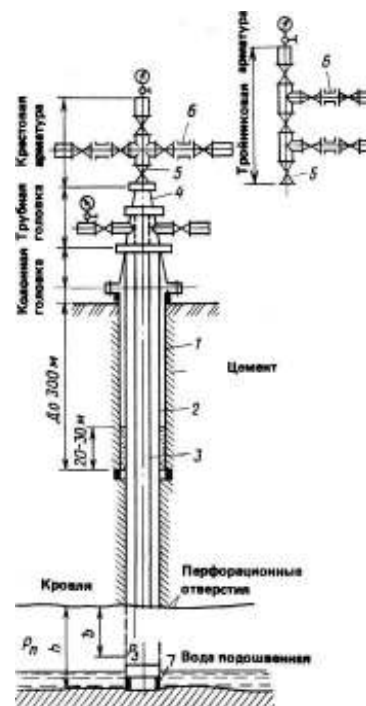


Рис. 1.9. Скважина

концентрация H_2S превышает нормативы более, чем в 30 раз, а запах сероводорода обнаруживается в 2-х км от перерабатывающего комплекса. При очистке от H_2S выделяются вредные соединения метанола.

Технология обработки газа насыщена сложным и экоопасным оборудованием. Источники выделения вредных веществ на УКПГ (установка комплексной подготовки газа) по их значимости можно расположить следующим образом: утечки через неплотности в арматуре, сжигание конденсата и метанольной воды, перекачка метанола и сжигание на факелах. В табл. 1.16 приведен массовый выброс H_2S на УКПГ [36].

Таблица 1.16

Результаты исследования выделений H_2S на УКПГ

Запорное оборудование	Количество, шт.	Количество разгерметизированного оборудования, %			Массовый расход сероводорода вследствие утечки, г/ч на УКПГ-3			
		УКПГ-3	УКПГ-6	УКПГ-8	лето	осень	зима	весна
Задвижки	280	28,2	16,4	18,7	0,51	0,82	1,78	1,24
Регулировочные клапаны	68	823	50,0	34,0	0,42	0,62	0,33	1,04
Шаровые краны	200	3,5	9,8	6,2	0,06	0,25	0,46	0,84
Продувочные краны	236	4,7	6,6	3,4	0,08	0,28	0,73	0,36
Итого					1,07	1,87	3,90	3,48

Схема магистральных нефтепроводов приведена на рис. 1.10.

Добывается нефть, также как и газ – через скважины, пробуренные от поверхности земли до нефтеносного пласта. Образующийся буровой шлам может содержать до 7,5% нефти и до 15% различных органических соединений.

Мощным источником опасных загрязнителей воздушного бассейна в нефтяной и газовой промышленности являются продукты сгорания нефти, конденсата, природного и нефтяного газа в факелах.

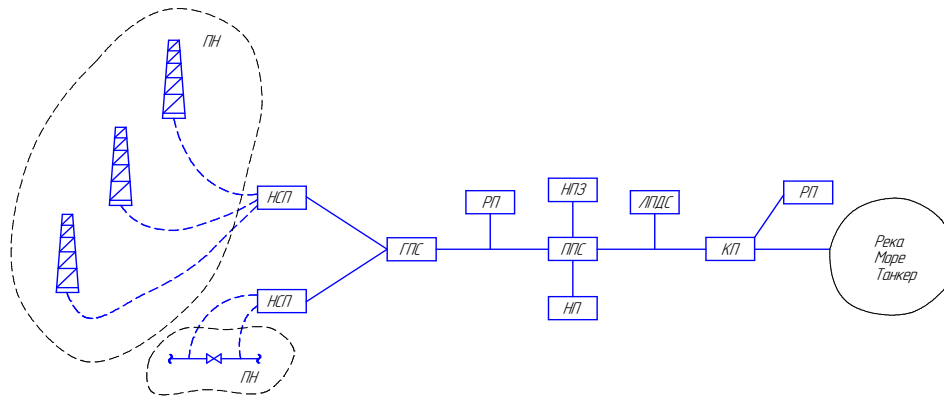


Рис. 1.10. Схема магистральных нефтепроводов: ПН – промысел нефти; НСП – нефтесборный пункт; ГПС – главная перекачивающая станция; ППС – промежуточная перекачивающая станция; РП – ремонтно-восстановительный пункт; НПЗ – нефтеперерабатывающий завод; НП – нефтеналивной пункт; ЛПДС – линейно-производственная диспетчерская станция; КП – конечный пункт; РП – резервуарный парк; Т - транспортировка к потребителю (ж/д., танкеры и др.)

Нефтеперерабатывающие заводы и станции комплексной подготовки газа оборудованы факельными системами для сброса углеводородных газов при аварийных ситуациях и от предохранительных клапанов. Факельные системы работают постоянно, загрязняя атмосферу.

В технологических циклах нефтепереработки углеводороды и сероводород выделяются через неплотности оборудования, арматуры и фланцевых соединений, сальники насосов и компрессоров атмосферно-вакуумных и вакуумных установок. В табл. 1.17 приведено ориентировочное количество выделений углеводородов от теплообменников, компрессоров и насосов [29].

Таблица 1.17

Выделение углеводородов от аппаратов технологических циклов нефтепереработки

Тип оборудования	Количество паров углеводородов, кг/ч, с температурой кипения, °С		
	<120	120...200	>200
Теплообменник кожухотрубный (холодильник, кипятильник)	0,2	0,1	0,05
Холодильник погружной	1	0,5	0,01
Аппарат воздушного охлаждения	0,1	0,07	0,04
Насос центробежный с торцовым уплотнением	0,30	0,15	0,1
с сальниковым уплотнением	0,5	0,25	0,15
с двойным торцевым уплотнением	0,1	0,05	0,03

Серьезное загрязнение атмосферы создают трубчатые печи нефтеперерабатывающих установок. В атмосферу выбрасываются в составе продуктов сгорания: оксид углерода (II), оксиды азота, диоксид серы и углеводороды. В качестве топлива для трубчатых печей используются газ, мазут и нефтезаводские газы, представляющие собой углеводородные газовые отдувки различных технологических процессов, с добавлением мазута при необходимости повышения их теплоты сгорания. В табл. 1.18 приведены концентрации токсичных компонентов в дымовых газах трубчатых печей при сжигании нефтезаводских газов в пересчете на $\alpha = 1,2$; в табл. 1.19 - при сжигании мазута в пересчете на $\alpha = 1,25...1,3$; в табл. 1.20 - при сжигании смеси газа и мазута с коэффициентом избытка воздуха $1,15...1,2$ (по материалам [29]).

Таблица 1.18

Концентрации токсичных ингредиентов дымовых газов трубчатых печей при сжигании нефтезаводских газов

Тип печи и ее назначение	Тип и компоновка горелки	Концентрация, мг/м ³	
		СО	NO _x
Цилиндрическая для расщепления тяжелых углеводородов	ФГМ-95ВП ФП-2	110	180
		90	200
Коробчатая для нагрева и испарения отбензиненной нефти	ФГМ-120 ГИК-2 и др.	120	215
		50	250
- первичной и вторичной переработки нефти и нефтепродуктов	ФГМ-95ВП, ФГМ-120 ФП-2, ГИК-2	60	210
		40	245
- каталитического риформинга при подогреве сырья и др	Одноярусная односторонняя ФГМ-95ВП, ФГМ-120 HPN-5	40	240
		50	215
тоже при депарафинизации	Многорярусная односторонняя ФГМ-95ВП, ГП-2, ФГМ-120 Многорярусная встречная	15	300

Таблица 1.19

Концентрации токсичных ингредиентов дымовых газов трубчатых печей при сжигании смеси газа и мазута

Тип печи, назначение	Тип и компоновка горелки	Соотношение газа и мазута по тепловыделению	Концентрации, мг/м ³			
			NO _x	SO ₂	C _m H _n	CO
Коробчатая для первичной переработки нефти	ГИК-2 подовая	65 : 35	240	700	0	100
Двухскатная для первичной переработки нефти	ФГМ-95ВП, фронтная	50 : 50	250	1330	35	520
для термокрекинга	ФГМ-95ВП, фронтная	4 : 96	350	2870	10	2800

Таблица 1.20

Концентрации токсичных ингредиентов дымовых газов трубчатых печей при сжигании мазута

Тип печи и ее назначение	Тип и компоновка горелки	Концентрация, мг/м ³	
		CO	NO _x
Коробчатая для гидрокрекинга	ФГМ-95ВП	600	320
Односкатная для подогрева	ФГМ-95ВП, ФГМ-120	2000	280
Двухскатная для дистилляции	ФГМ-95	1200	260
- для термокрекинга нефти	ФГМ-95ВП	2850	360

Крупным источником загрязнения воздуха являются резервуары для хранения нефти (в подземных металлических резервуарах потери бензина составляют 0,3% при заполнении на 90%, 1% - на 70% и около 10% при заполнении на 20%).

1.5.3. Транспортировка газа и нефти

В настоящее время по магистральным трубопроводам транспортируется весь добываемый природный газ, почти вся нефть, а также значительная часть нефтепродуктов.

Наибольшую опасность окружающей среде приносят разрывы трубопроводов [34, 36]. Подсчитано, что в среднем при одном прорыве

нефтепровода выбрасывается 2 т нефти, приводящей в непригодность более 1000 м² плодородной земли.

Разрывы магистральных газопроводов, продувка газопроводов и утечки природного газа из магистральных газопроводов, находящихся под высоким давлением, представляют опасность для окружающей среды с позиции возрастания «парникового эффекта». Следует заметить, что эффективность метана, как «парникового» газа в 21 раз выше чем углекислого газа (CO₂). По предварительным подсчетам утечки метана составляют в России свыше 20 млн. тонн (в пересчете на CO₂).

Крупными загрязнителями атмосферы на объектах дальнего транспорта газа являются **компрессорные станции**. Это утечки природного газа и одорантов в компрессорах, а также продукты сгорания газоперекачивающих агрегатов (ГПА).

Таблица 1.21

Содержание вредных веществ в выбросах газоперекачивающих агрегатов

Тип ГПА	Номинальный расход топливного газа, тыс. м ³ /год	Высота выброса, м	Количество выбросов вредных веществ, т / год	
			NO _x	CO
ГТН-25	83255	11,4-21,7	154,84	2201,5
ГПА-Ц-16	52980	12-13	393,73	990,36
ГПУ-10	34700	8-12	186,63	1119,8
ГТК-10	31536	15-22	336,84	1260,2
ГПА-Ц-6,3	25544	6-10	198,00	829,50

Анализ таблицы 1.21 показывает, что на самом меньшем по производительности агрегате ГПА-Ц-6.3 в камерах сгорания сжигается свыше 25 млн. м³ природного газа в год. При этом на 1 м³ сжигаемого газа выбрасывается около 8г NO_x и 30г CO. Загрязнение атмосферы резко возрастает с увеличением мощности перекачивающего аппарата.

1.5.4. Использование газа и нефти

Природный газ используется как технологическое сырье в химической промышленности и для энергетических целей. Нефть используется для

получения разных видов моторного топлива, мазута и как углеводородное сырье в химической промышленности.

Негативное воздействие процессов сжигания топлива в промышленных печах было рассмотрено ранее в разделе 1.3, а загрязнение атмосферы выбросами промышленных и отопительных котлов – в разделе 1.4.

1.5.5. Угольная отрасль топливной промышленности

Добыча каменного угля

В мире добывается свыше 2 млрд. тонн угля в год. В странах СНГ добыча угля превышает 800 млн. тонн.

Угольная отрасль промышленности является крупным загрязнителем воздушного бассейна. Выброс вредных веществ в атмосферный воздух составляет 27 млрд. м³ метана, 27 млрд. м³ СО, 200 тыс.т твердых частиц.

Загрязнение воздушной среды является следствием выделения пыли и газообразных частиц при эксплуатации горнодобывающей техники, взрывных работах, складировании горных пород, погрузке и транспортировке угля. Особенно опасно возгорание отвалов. От одного горящего террикона (уголь с низким содержанием серы 0,5%) за один час выброс в атмосферу составит около 80 кг SO₂ и 200 кг СО.

При разработке месторождений открытым способом к основным источникам загрязнения относятся производство массовых взрывов и эксплуатация горнодобывающей техники. Массовые взрывы на карьере производятся обычно 1 раз в неделю. Заряд взрыва – 800-1200 тонн, а количество взорванной горной массы – 6 млн. тонн. При этом в атмосферу выбрасывается 200-400 тонн пыли и 6-8 тыс. м³ вредных газов.

Переработка угля

К существенным источникам загрязнения атмосферы в районе добычи относятся предприятия по переработке низкокалорийного угля: брикетные и углеобогащательные фабрики. Брикетные фабрики выбрасывают свыше 35 млрд. м³ загрязненного воздуха и свыше 30 тыс. тонн угольной пыли.

Обогащительные фабрики имеют объем выброса около 100 млрд.м³, содержат свыше 4 тыс. тонн угольной пыли и 3,5 тыс. тонн SO₂.

1.6. Примеры расчёта

Пример 1.1. Определить массовый выброс бенз(а)пирена от производственно-отопительной котельной установки с 5 паровыми котлами марки ДЕ-10-14. Исходные данные: топливо – мазут сернистый М 40; теплота сгорания 39,73 МДж/кг, расход топлива котлоагрегатом 0,185 кг/с. Учесть влияние рециркуляции продуктов сгорания (степень рециркуляции газов в дутьевой воздух $r = 0,2$).

Решение:

Параметр	Обозначение	Обоснование или формула	Значение	Ед. изм.
Потери теплоты от механической неполноты сгорания	q_4	[5, табл. В1, прил. В]	0,1	%
Расчётный расход топлива котлоагрегата	$B_p^{ка}$	ф-ла (1.38)	0,185	кг/с
Расчётный расход топлива котельной	$B_p^{кы}$	$B_p^{ка} \times 5$	0,93	кг/с
			3,33	т/ч
		$B_p^{кы} \times 5500$ ч	18323	т/год
Коэффициент избытка воздуха на выходе из топки (горелка ГМ-7)	α''_T	[33, табл. 7.53, С. 212]	1,1	
Объём топки	V_T	[33, табл. 8,20, С. 250]	17,14	м ³
Теплонапряжение топочного объема	q_v	ф-ла (1.57)	429	кВт/м ³
Коэффициент, учитывающий способ распыливания мазута	R	для паромеханических форсунок	0,75	
Коэффициент, учитывающий влияние нагрузки котла	K_d	[5, рис. Е1 прил. Е] или прил. Б	1	
Коэффициент, учитывающий влияние рециркуляции	K_p	[5, рис. Е2 прил. Е] или прил. Б	1,78	
Коэффициент, учитывающий влияние ступенчатого сжигания	$K_{ст}$	[5, рис. Е3 прил. Е] или прил. Б	1	
Концентрация бенз(а)пирена при $\alpha''_m (K_p = 1)$	$c_{бп}^M$	ф-ла (1.53)	0,000267	мг/м ³
Концентрация бенз(а)пирена при α''_m с учётом рециркуляции ($K_p = 1,78$)	$c_{бп}^M$	ф-ла (1.53)	0,000474	мг/м ³
Концентрация бенз(а)пирена при $\alpha_0 = 1,4 (K_p = 1)$	$c'_{бп}$	ф-ла (1.62)	0,000210	мг/м ³
Концентрация бенз(а)пирена при $\alpha_0 = 1,4$ с учётом рециркуляции	$c'_{бп}$	ф-ла (1.62)	0,000373	мг/м ³
Объём сухих газов при $\alpha_0 = 1,4$	$V_{сг}$	ф-ла (1.52)	14,22	м ³ /кг
Масса бенз(а)пирена без учёта рециркуляции ($K_p = 1$)	$M_{бп}$	ф-ла (1.51)	$2,76 \times 10^{-6}$	г/с
			$5,46 \times 10^{-5}$	т/год
Масса бенз(а)пирена с учётом рециркуляции	$M_{бп}$	ф-ла (1.51)	$4,91 \times 10^{-6}$	г/с
			$9,72 \times 10^{-5}$	т/год

Ответ: Рециркуляция продуктов сгорания (при кратности рециркуляции $r = 20\%$) увеличивает выбросы бенз(а)пирена на 78 %.

Пример 1.2. Определить массовые выбросы оксидов азота от производственно-отопительной котельной установки с 4 паровыми котлами марки ДКВр-10-13. Исходные данные: топливо – природный газ; теплота сгорания 36 МДж/м³; расход топлива котлоагрегатом 0,203 м³/с. Учесть влияние ступенчатого ввода воздуха в топочную камеру ($\delta=15\%$).

Решение:

Параметр	Обозначение	Обоснование или формула	Значение	Ед.изм.
Расчётный расход топлива котлоагрегата	$B_p^{ка}$	$B_p^{ка} = B^{ка}$	0,203	м ³ /с
Расчётный расход топлива котельной	$B_p^{ку}$	$B_p^{ка} \times 4$	0,81	м ³ /с
		$B_p^{ку} \times 5500 \text{ ч}$	2,92	тыс. м ³ /ч
Удельный выброс оксидов азота	$K_{NO_2}^r$	ф-ла (1.32)	0,062	г/МДж
Коэффициент, учитывающий конструкцию горелки	β_k	для дутьевых горелок напорного типа	1	
Коэффициент, учитывающий температуру воздуха, подаваемого для горения	β_t	при отсутствии воздухоподогревателя	1	
Коэффициент, учитывающий влияние избытка воздуха	β_α	в общем случае	1,225	
Коэффициент, учитывающий влияние рециркуляции дымовых газов	β_r	-	0	
Коэффициент, учитывающий ступенчатый ввод воздуха	β_δ	ф-ла (1.36)	0,33	
Масса оксидов азота NO _x без учёта ступенчатого сжигания	M_{NO_x}	ф-ла (1.31)	2,20	г/с
			43,62	т/год
В том числе:				
Масса диоксида азота NO ₂	M_{NO_2}	ф-ла (1.31)	1,76	г/с
			34,89	т/год
Масса оксида азота NO	M_{NO}	ф-ла (1.44)	0,29	г/с
			5,67	т/год
С учётом ступенчатого сжигания ($\delta=15\%$)				
Масса оксидов азота NO _x	M_{NO_x}	ф-ла (1.31)	1,48	г/с
			29,22	т/год
В том числе:				
Масса диоксида азота NO ₂	M_{NO_2}	ф-ла (1.31)	1,18	г/с
			23,38	т/год
Масса оксида азота NO	M_{NO}	ф-ла (1.44)	0,19	г/с
			3,80	т/год

Ответ: Ступенчатый ввод воздуха в топочную камеру ($\delta=15\%$) снижает выбросы оксидов азота на 33%.

Пример 1.3. Определить массовые выбросы оксида углерода от производственно-отопительной котельной установки с 3 паровыми котлами марки ДЕ-16-14. Исходные данные: топливо – природный газ; теплота сгорания 36 МДж/м³; расход топлива котлоагрегатом 0,324 м³/с.

Решение:

Параметр	Обозначение	Обоснование или формула	Значение	Ед.изм.
Расход топлива котельной	$B^{ку}$	$B^{ка} \times 3$	1,00	м ³ /с
			3,60	тыс. м ³ /ч
		$B^{ку} \times 5500$ ч	19824	тыс. м ³ /год
Потери теплоты от химической неполноты сгорания	q_3	[5, табл. В1, прил. В]	0,2	%
Количество оксида углерода	C_{CO}	ф-ла (1.30)	3,493	г/м ³ (кг/тыс.м ³)
Масса оксида углерода	M_{CO}	ф-ла (1.28)	3,50	г/с
		ф-ла (1.29)	69,25	т/год

Пример 1.4. Сравнить массовый выброс оксидов серы от производственно-отопительной котельной установки с 4 паровыми котлами марки ДЕ-16-14, работающей на мазуте высокосернистом М100 и мазуте малосернистом М100. Исходные данные: теплота сгорания высокосернистого мазута 38,77 МДж/кг (малосернистого 40,28 МДж/кг); расчётный расход топлива котлоагрегатом 0,304 кг/с (0,292 кг/с).

Решение:

Параметр	Обозначение	Обоснование или формула	Значение	Ед.изм.
Расчётный расход топлива котельной, работающей на высокосернистом мазуте (малосернистом мазуте)	$B^{ку}$	$B^{ка} \times 4$	1 215,17 (1 169,62)	г/с
			4,37 (4,21)	т/ч
		$B^{ку} \times 5500$ ч	24 060,4 (23 158,4)	т/год
Содержание серы в топливе на рабочую массу для высокосернистого мазута (для малосернистого)	S^r	[33, табл. 2.8 С. 35]	2,8 (0,3)	%
Доля оксидов серы, связываемых летучей золой в котле	η'_{SO_2}	принимаем	0,02	
Доля оксидов серы, улавливаемых в мокром золоуловителе	η''_{SO_2}	при отсутствии скруббера	0	
Масса диоксида серы	M_{SO_2}	ф-ла (1.45)	66,69 (6,88)	г/с
			1 320,43 (136,17)	т/год

Ответ: Массовый выброс диоксида серы при сжигании высокосернистого мазута больше в 10 раз больше, чем при сжигании малосернистого мазута.

Контрольные вопросы к главе 1

1. Какие токсичные вещества образуются при сжигании газообразного топлива? Назовите их физико-химические свойства.
2. Назовите физико-химические свойства токсичных веществ, которые образуются при сжигании мазута? Чем отличается воздействие золы мазута от нейтральной золы?
3. Какие токсичные вещества образуются при сжигании твёрдого топлива? При каких условиях образуются твёрдые частицы в виде кокса и золы?
4. В чем заключается воздействие бенз(а)пирена (БП) на организм человека?
5. Каковы различия в низкотемпературном и высокотемпературном механизме образования бенз(а)пирена? Приведите примеры образования БП при сжигании природного газа и мазута.
6. Как различаются оксиды азота по механизму образования? Изменяется ли соотношение NO/NO_2 при движении по газовому тракту и при выбросе в атмосферу?
7. К какому классу опасности относятся оксиды углерода и серы?
8. Каковы различия в расчете бенз(а)пирена до и после проведения мероприятий по снижению выбросов оксидов азота технологическими методами?
9. Каким образом учитываются параметры процесса горения и наличие природоохранных мероприятий при расчете выбросов оксидов азотов?
10. Проанализируйте зависимости удельного выброса оксидов азота при сжигании природного газа и мазута в паровых и водогрейных котлах.
11. Какие условия топочного процесса определяют образование бенз(а)пирена (см. расчётные зависимости)?
12. Каково воздействие процессов добычи различных видов топлива на воздушный бассейн?
13. Какие вредные вещества выделяются при обработке природного газа перед подачей в систему магистральных газопроводов?
14. Перечислите выбросы установок комплексной подготовки природного газа (УКПП).
15. Каково воздействие компрессорных станций на воздушный бассейн?
16. Как зависит выброс вредных веществ от способов добычи и переработки угля?
17. Каково влияние массовых взрывов и горнодобывающей техники на загрязнение атмосферного воздуха при разработке месторождений угля?

2. ВЕНТИЛЯЦИОННЫЕ ВЫБРОСЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ КАК ИСТОЧНИКИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА

Существенный выброс загрязняющих веществ в атмосферу создают вентиляционные выбросы промышленных производств.

Состав вентиляционных выбросов зависит от специфики технологических процессов, в том числе качества исходного сырья, объема выпускаемой продукции, количества технологических звеньев, в которых выделяются загрязнения.

В табл. 2.1 приведены основные источники загрязнения и загрязняющие вещества, выделяющиеся в различных отраслях промышленности и технологических процессах.

Таблица 2.1

Основные промышленные источники загрязнения воздушного бассейна

Производство	Аэрозоли	Газообразные вещества
Химическая промышленность	пыль, сажа	H ₂ S, CO, CS ₂ , NH ₃ , растворители, кислоты, альдегиды, органические вещества, сульфиды, сульфаты, хлориды и др.
Металлургическая и коксохимическая промышленность	пыль, сажа, оксиды железа	CO, SO ₂ , NO _x , NH ₃ , органические вещества, фтористые соединения, бенз(а)пирен
Нефтеперерабатывающая промышленность	пыль, сажа	H ₂ S, SO ₂ , CO, NO _x , CS ₂ , NH ₃ , углеводороды, альдегиды, меркаптаны, кетоны, канцерогенные вещества
Промышленность строительных материалов	пыль	CO, SO ₂ , NO _x , канцерогенные вещества, углеводороды, альдегиды
Сварочное производство	соединения железа, хрома, марганца, фториды, соли никеля, вольфрама, Al ₂ O ₃	HF, SiO, TiO, Cr ₂ O ₃
Гальваническое производство	аэрозоли щелочей, кислот, соли металлов	NH ₃ , NO _x , HCl, HF, HCN
Окрасочное производство	аэрозоли краски	пары растворителей

Анализ табл. 2.1 показывает, что выбросы *промышленных* установок отличаются большим разнообразием выделяемых вредных веществ. Ниже

приведена характеристика токсичных веществ, являющихся наиболее массовыми загрязнителями воздушного бассейна.

2.1. Приоритетные загрязняющие вещества. Свойства. Гигиеническая характеристика

Вредные вещества, выделяемые в промышленных процессах, оказывают негативное воздействие на окружающую среду непосредственно, после химических превращений в атмосфере, либо совместно с другими веществами. Загрязняющие вещества, выделяемые в промышленных процессах, по агрегатному состоянию могут быть твердыми, жидкими, газообразными.

Крупным загрязнителем атмосферного воздуха являются **взвешенные частицы**. Например, в выбросах машиностроительных заводов они превышают 40% всех выбросов, а в строительной промышленности – более 70%.

Термин «**взвешенные частицы**» используется для описания взвешенных в воздухе твердых и жидких частиц, размером больше молекулы, но менее 500 мкм (0,5 мм). Взвешенные частицы разделяются на пыли (мелкая, размером частиц менее 100 мкм и крупная – более 100 мкм), дымки (0,001 – 1) мкм и туманы – (0,01-10) мкм.

Дисперсная система, состоящая из микроскопических твердых или жидких частиц, взвешенных в газообразной среде, называется **аэрозолем**. Размер частиц - от нескольких нм (1 нанометр равен 10^{-9} м) до долей мм.

Взвешенные частицы сами по себе представляют серьезную угрозу для здоровья человека. Эта угроза возрастает, когда они комбинируются с другими загрязнителями. Мелкие частицы попадают в систему дыхания человека; если их размеры лежат в пределах 0,01 – 0,1 мкм, то 50% этой мельчайшей пыли оседает в легких. При концентрации пыли в 750 мкг/м^3 с одновременным присутствием SO_2 в количестве более 715 мкг/м^3 может наступить значительное ухудшение здоровья и даже смерть. Пыль, на которой сорбировались частицы бенз(а)пирена, становится канцерогенно опасной.

Взвешенные частицы увеличивают коррозию стали, задерживаясь на листьях растений, замедляют обменные процессы, ухудшают видимость, увеличивают вероятность осадков, тумана.

Инертные взвешенные частицы относятся к 3 классу опасности и имеют ПДК от 1 до 10 мг/м^3 в зависимости от размера. Токсичные пыли, например пыль свинца, мышьяка и других токсичных веществ, имеют класс опасности в соответствии с этими веществами.

Следующей существенной группой загрязнителей являются **растворители**, используемые для нанесения лакокрасочных покрытий в различных отраслях промышленности.

По химической природе растворители можно разделить на следующие группы: углеводородные, к числу которых относят алициклические углеводороды (циклогексан); ароматические (бензол, толуол, ксилол); терпены (скипидар); кетоны (ацетон, диацетоновый спирт); простые и сложные эфиры (бутилацетат, этилацетат, этилцеллозольв); спирты (этиловый, бутиловый, пропиловый); галогеносодержащие растворители (хлорбензол).

Основные вредные вещества, содержащиеся в лакокрасочных материалах, по степени воздействия делятся:

- высокоопасные (II класс опасности): бензол, дихлорэтан, фенол, формальдегид;
- умеренно опасные (III класс опасности): бутилакрилат, винилацетат, ксилол, спирты (бутиловый, пропиловый, ацетопропиловый, метиловый, диацетоновый), стирол, толуол, триэтиламин, хлорбензол, циклогексанон;
- малоопасные (IV класс опасности): аммиак, амилацетат, ацетон, диэтиламин, изопропилбензол, метилацетат, нитропропан, скипидар, сольвент, спирт этиловый, уайт-спирит, этилацетат, этилцеллозольв.

Растворители обладают рефлекторным действием, раздражают слизистые оболочки глаз и дыхательных путей, при хроническом отравлении наблюдаются расстройства пищеварения, изменения в крови и кроветворных органах, особенно при вдыхании растворителей, относящихся ко 2 классу опасности. Многие растворители обладают свойством накапливаться в организме; усиливают уже возникшие заболевания, в том числе, онкологические.

Ниже приведены некоторые свойства и гигиеническая характеристика наиболее распространенных растворителей.

Аммиак – бесцветный газ с резким удушливым запахом $t_{\text{кип}} = 33,35^{\circ}\text{C}$;
 $\text{ПДК}_{\text{мр}} = 0,2 \text{ мг/м}^3$, $\text{ПДК}_{\text{сс}} = 0,04 \text{ мг/м}^3$.

Ацетон – летучая бесцветная жидкость с характерным запахом, $t_{\text{кип}} = 56,1^{\circ}\text{C}$.
 $\text{ПДК}_{\text{мр}} = 0,35 \text{ мг/м}^3$, $\text{ПДК}_{\text{сс}} = 0,35 \text{ мг/м}^3$.

Бензол – бесцветная жидкость, $t_{\text{кип}} = 80,1^{\circ}\text{C}$. Устойчив к действию окислителей.
 $\text{ПДК}_{\text{мр}} = 0,3 \text{ мг/м}^3$, $\text{ПДК}_{\text{сс}} = 0,1 \text{ мг/м}^3$.

Бутилацетаты – эфиры, $t_{\text{кип}} = 116,5^{\circ}\text{C}$, $\text{ПДК}_{\text{мр}} = 0,1 \text{ мг/м}^3$, $\text{ПДК}_{\text{сс}} = 0,1 \text{ мг/м}^3$.

Ксилолы (диметилбензолы) $\text{C}_6\text{H}_4(\text{CH}_3)_2$ – бесцветные жидкости. В качестве

растворителей используется смесь изомеров (орто -мета- пара) ксилолы с температурами кипения $t_{\text{кип}}=144, 139$ и 138°C соответственно. Содержатся в каменноугольной смоле и в продуктах нефтепереработки. $\text{ПДК}_{\text{мр}}=0,2 \text{ мг/м}^3$; $\text{ПДК}_{\text{сс}}=0,2 \text{ мг/м}^3$.

Скипидар (терпентинное масло) – бесцветная жидкость с запахом хвои. Сложная смесь углеводородов, $t_{\text{кип}}=(153\div 180)^{\circ}\text{C}$, $\text{ПДК}_{\text{мр}}=2 \text{ мг/м}^3$, $\text{ПДК}_{\text{сс}}=1 \text{ мг/м}^3$.

Толуол $\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_3$ – бесцветная жидкость, $t_{\text{кип}}=110,6^{\circ}\text{C}$. Используется как растворитель полимеров $\text{ПДК}_{\text{мр}}=0,6 \text{ мг/м}^3$, $\text{ПДК}_{\text{сс}}=0,6 \text{ мг/м}^3$.

Хлорбензол $\text{C}_6\text{H}_5\text{Cl}$ – бесцветная жидкость с характерным запахом, $t_{\text{кип}}=132^{\circ}\text{C}$. $\text{ПДК}_{\text{мр}}=0,1 \text{ мг/м}^3$, $\text{ПДК}_{\text{сс}}=0,03 \text{ мг/м}^3$.

Стирол (винилбензол) $\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}=\text{CH}_2$ – бесцветная жидкость со своеобразным запахом, $t_{\text{кип}}=145,2^{\circ}\text{C}$. Легко полимеризуется. $\text{ПДК}_{\text{мр}}=0,04 \text{ мг/м}^3$, $\text{ПДК}_{\text{сс}}=0,002 \text{ мг/м}^3$.

Фенол $\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$ – бесцветные, розовеющие на воздухе кристаллы, $t_{\text{пл}}=43^{\circ}\text{C}$. $\text{ПДК}_{\text{мр}}=0,01 \text{ мг/м}^3$, $\text{ПДК}_{\text{сс}}=0,003 \text{ мг/м}^3$.

Формальдегид HCHO – бесцветное газообразное вещество с резким запахом, $t_{\text{кип}}=19,2^{\circ}\text{C}$. $\text{ПДК}_{\text{мр}}=0,035 \text{ мг/м}^3$, $\text{ПДК}_{\text{сс}}=0,003 \text{ мг/м}^3$.

Крупным загрязнителем воздушного бассейна являются **гальваническое производство**. Травильные и моечные растворы в большинстве своем являются вредными и опасными. Травление обычно сопровождается выделением газообразного водорода в виде пузырьков, которые выносят мельчайшие капельки растворов, кислот, щелочей. Они образуют над поверхностью ванн туман, весьма вредный для людей.

Нанесение металлических покрытий гальваническим методом связано с применением опасных для организма человека различных кислот, цианистых соединений, щелочных и кислых электролитов, кадмиевых, свинцовых, никелевых солей и хромового ангидрида.

Разнообразие гальванических и химических процессов, применяемых при этом химических веществ, температурных режимов, обуславливает разнообразие качественного и количественного состава выделяющихся загрязняющих веществ, их агрегатных состояний (см. табл. 2.2).

Анализ табл. 2.2 показывает, что наиболее опасными токсичными веществами (1й класс опасности) в выбросах гальванического производства являются хромовый ангидрид Cr_2O_3 , соединения кадмия, никеля и свинца, цианистый водород HCN , фтористый водород HF . Существенную опасность представляют вещества 2 класса опасности - HCl , H_2SO_4 , NaOH .

Таблица 2.2

Перечень выбросов загрязняющих веществ в гальванических процессах

Аэрозоли	Класс опасности	Пары	Класс опасности
H ₂ SO ₄	II	HCl	II
HCl	II	NO _x	III
Cr ₂ O ₃	I	SO ₂	III
NaOH	II	HCN	I
Соединения Cd, Ni, Pb	I	HF	I
Соли серной, соляной, цианисто-водородной, фосфорной кислот	II - III		

Рассмотрим свойства и допустимые концентрации наиболее распространенных загрязнителей *гальванического* производства.

Хромовый ангидрид Cr₂O₃ – сильный окислитель, разрушает органические материалы, является взрывоопасным и пожароопасным. ПДК_{мр} – не нормируется; ПДК_{сс}=0,0015 мг/м³.

Синильная кислота (цианисто-водородная кислота, **цианистый водород**) **HCN** – бесцветная легколетучая жидкость с запахом горького миндаля; $t_{\text{плав.}}=13,3^{\circ}\text{C}$, $t_{\text{кип.}}=26,7^{\circ}\text{C}$. Соли синильной кислоты – **цианиды**. ПДК_{мр} – не нормируется; ПДК_{сс} = 0,01 мг/м³.

Хлористый водород, HCl – бесцветный газ с резким запахом, на воздухе газ «дымит», образуя с парами воды мелкие капли; $t_{\text{кип.}}=84,8^{\circ}\text{C}$. Хорошо растворяется в воде с образованием соляной кислоты. ПДК_{мр}=0,2 мг/м³, ПДК_{сс}=0,2 мг/м³.

Серная кислота H₂SO₄ – сильная двухосновная кислота. Безводная серная кислота – бесцветная маслянистая жидкость, плотность 1,9203 г/см³, $t_{\text{плав.}}=10,3^{\circ}\text{C}$, $t_{\text{кип.}}=296,2^{\circ}\text{C}$.

С водой смешивается во всех отношениях. Концентрированная серная кислота реагирует почти со всеми металлами, образуя соли – сульфаты. ПДК_{мр}=0,3 мг/м³, ПДК_{сс}=0,1 мг/м³.

Натрия гидроксид NaOH – сильное основание (щелочь). Бесцветные кристаллы (технический продукт – белая непрозрачная масса), $t_{\text{плав.}}=320^{\circ}\text{C}$. Гигроскопичен, легко и с большим разогреванием растворяется в воде. ОБУВ = 0,01 мг/м³.

Таким образом, *растворители*, используемые в **лакокрасочном** производстве и вредные вещества **гальванических** процессов, оказывают серьезное негативное воздействие на человека, тем более что эти процессы имеются на большинстве крупных промышленных предприятий.

При выполнении **сварочных работ** атмосферный воздух загрязняется сварочным аэрозолем, в составе которого в зависимости от вида сварки, марок электродов и флюса находятся вредные для здоровья оксиды металлов (железа, марганца, хрома, никеля и др.), а также газообразные соединения

(фтористые, оксиды углерода и азота, озон и др.) и неорганическая пыль.

Фтористый водород HF – бесцветная легколетучая жидкость, сильно «дымящая» на воздухе, $t_{\text{кип}} = 19,52^{\circ}\text{C}$. Неограниченно растворим в воде. ПДК_{мр}=0,02 мг/м³, ПДК_{сс}=0,005 мг/м³.

Фториды, выделяющиеся при сварочных работах, следует классифицировать как плохорастворимые неорганические фториды (ПДК_{м.р.}=0,2 мг/м³) [7, прил. 1].

Неорганическая пыль – твёрдое вещество, содержащее диоксид кремния (кремнезём). Для пыли с содержанием SiO₂ менее 20%: ПДК_{мр}=0,5 мг/м³, ПДК_{сс}=0,15 мг/м³. Для пыли с содержанием SiO₂ (20-70)%: ПДК_{мр}=0,3 мг/м³, ПДК_{сс}=0,1 мг/м³. Для пыли с содержанием SiO₂ более 70%: ПДК_{мр}=0,15 мг/м³, ПДК_{сс}=0,05 мг/м³.

Механическая обработка металлов. К механической обработке металлов относятся процессы резания и абразивной обработки, которые в свою очередь включают процессы точения, фрезерования, сверления, шлифования, полирования и др. Характерной особенностью процессов механической обработки является образование отходов в виде твёрдых частиц (промышленной пыли), а в случае применения смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ) - аэрозолей масла и эмульсола.

При механической обработке металлов выделяющаяся **пыль**, в основном, классифицируется [7, прил. 1]:

- при обработке стали и чугуна как оксид железа;
- при обработке цветных металлов пыли присваивается код оксида обрабатываемого металла;
- при обработке сплавов цветных металлов кодирование пыли производится по оксиду металла, являющегося основным (по массе) компонентом сплава.

При отсутствии соответствующих критериев качества атмосферного воздуха на пыль оксидов цветных металлов выделяемой пыли можно присваивать (взвешенные вещества).

Полирующая паста изготавливается на основе оксида железа и оксида хрома (ПДК см. FeO и Cr₂O₃), светло-зелёного цвета. Абразивная пыль содержит корунд (алюминия оксид Al₂O₃) – бесцветные кристаллы, плотность 3,96 г/см³.

Для абразивной и металлической пыли: ОБУВ = 6 мг/м³. Войлочная пыль (шерстяная): ОБУВ=0,03 мг/м³. Эмульсол ОБУВ=0,05 мг/м³. Минеральное масло: ОБУВ=0,05 мг/м³.

В целлюлозно-бумажной, химической, металлургической и др. отраслях промышленности выбрасывается ряд *особо вредных* веществ, *микропримеси* которых представляют высокую опасность для человека. Это так называемые **«ксенобиотики»** – вещества, неприемлемые для живых организмов.

Типичными представителями этой группы являются **диоксины** – полихлорированные полициклические соединения (ПХПС). Под этим

названием объединяют более 200 веществ: полихлорированных дибензодиоксидов (ПХДД) и дибензофуранов (ПХДФ). Диоксины относятся к 1 классу опасности, предельно допустимые концентрации (ПДК) различных веществ этой группы в воздухе колеблются в пределах $(1 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^{-12})$ мг/м³.

Диоксины выделяются, где имеются процессы отбеливания или термической обработки материалов, содержащих резину, полихлорвинил и другие хлорсодержащие вещества. Особенно много выделяется диоксинов при возгорании отходов, где пластик, резина, линолеум, изоляционная лента, пакеты лакокрасочных материалов находятся вместе с влажными пищевыми отходами.

Такая высокая опасность ксенобиотиков связана с их способностью легко проникать в ядра клеток живых организмов, вызывая с одной стороны, ускоренное разрушение гормонов, витаминов и др., а с другой – активизацию канцерогенов, нейротоксических газов, и даже превращение безвредных соединений в чрезвычайно токсичные.

Ввиду чрезвычайной химической устойчивости диоксины накапливаются в почве, растительности, животных и организме человека.

2.2. Расчет масс загрязняющих веществ в вентиляционных выбросах различных производственных процессов

Расчет массы вредных веществ, выбрасываемых с вентиляционным воздухом в атмосферу, проводится в соответствии с методиками, разработанными НИИ Атмосферы и утвержденными Роскомэкологии [7, 9-12, 14].

Ниже приведены выборочно методики расчета выбросов в атмосферу (по величинам удельных выделений) применительно к различным производственным процессам.

2.2.1. Окрасочное производство

Образование токсичных веществ. Выделение вредных веществ окрасочного производства зависит от стадии процесса, способа окраски, количества и типа используемых окрасочных материалов.

Процесс окраски изделий состоит из следующих операций:

- подготовка поверхности изделия;
- нанесение окрасочного материала (краски, лака);
- сушка изделия (удаление паров растворителей).

Термины и определения по ГОСТ 28451–90 (ИСО 4617–1–3–86) :

Краска – жидкий или порошкообразный продукт, содержащий пигменты, которые после нанесения на поверхность образуют непрозрачную пленку, обладающую защитными, декоративными или специальными техническими свойствами.

Лак – продукт, который после нанесения на поверхность образует твердую прозрачную пленку, обладающую защитными, декоративными или специальными техническими свойствами.

Растворитель для лакокрасочного материала – жидкость одно или многокомпонентная, летучая в условиях сушки, в которой пленкообразующее полностью растворяется.

Шпатлевка, грунтовка – продукт пастообразной или жидкой консистенции применяемый для устранения небольших дефектов поверхности перед окраской.

Процесс нанесения лакокрасочного покрытия может быть различным, но преимущественно осуществляется методом пневматического распыления.

В процессе окраски и сушки происходит полный переход летучей части краски (растворителей) в парообразное состояние причем, при окраске выделяется (20÷30)% паров растворителей, при сушке – остальное количество используемых растворителей.

Расчет массы загрязняющих веществ.

В качестве исходных данных для расчета выбросов загрязняющих веществ при различных способах нанесения ЛКМ принимают: фактический или плановый расход окрасочного материала, долю содержания в нем растворителя, долю компонентов лакокрасочного материала, выделяющихся из него в процессах окраски и сушки.

Выброс загрязняющих веществ в операциях подготовки поверхности, окраски и сушки зависит от ряда факторов: способа окраски, производительности применяемого оборудования, состава лакокрасочного материала (ЛКМ) и др.

Расчёт проводится по удельным выделениям [9]. Удельное выделение (г/кг) – количество (масса) данного вещества, выделяющего в атмосферу в

ходе технологического процесса, отнесенное к единице материального показателя, характеризующего этот процесс.

Расчет количества загрязняющих веществ образовавшихся в виде аэрозолей. Количество **аэрозоля** краски, кг, выделяющегося при нанесении ЛКМ на поверхность изделия (детали), определяется по формуле:

$$M_{\text{ок}}^{\text{а}} = m_{\text{к}} \cdot \sigma_{\text{а}} \cdot 10^{-2}, \quad (2.1)$$

где $m_{\text{к}}$ – масса краски, используемой для покрытия, кг; $\sigma_{\text{а}}$ – доля краски, потерянной в виде аэрозоля, % (см. табл. 2.4).

Расчет количества загрязняющих веществ в виде паров органических растворителей при окраске. Количество летучей части каждого компонента, кг определяется по формуле:

$$M_{\text{ок}}^{\text{пар}} = m_{\text{к}} \cdot f_{\text{р}} \cdot \sigma'_{\text{р}} \cdot 10^{-4}, \quad (2.2)$$

где $f_{\text{р}}$ – доля летучей части (растворителя) в ЛКМ, % (см. табл. 2.3); $\sigma'_{\text{р}}$ – доля растворителя в ЛКМ, выделившегося при нанесении покрытия (см. табл. 2.4).

Расчет количества загрязняющих веществ в виде паров органических растворителей при сушке, кг. В процессе сушки происходит практически полный переход летучей части ЛКМ (растворителя) в парообразное состояние:

$$M_{\text{суш}}^{\text{пар}} = m_{\text{к}} \cdot f_{\text{р}} \cdot \sigma''_{\text{р}} \cdot 10^{-4}, \quad (2.3)$$

где $\sigma''_{\text{р}}$ – доля растворителя в ЛКМ, выделившаяся при сушке покрытия (см. табл. 2.4).

Расчет валового выброса загрязняющих веществ. Валовый выброс **аэрозоля** краски, т/год при наличие газоочистки вычисляется по формуле:

$$M_{\text{ок}}^{\text{а}} = m'_{\text{к}} \cdot \sigma_{\text{а}} \cdot (1 - j) \cdot 10^{-5}, \quad (2.4)$$

где $m'_{\text{к}}$ – фактический годовой расход ЛКМ, кг; j – степень очистки воздуха газоочистным оборудованием (в долях единицы).

Валовый выброс индивидуального **летучего компонента**, т/год при наличии газоочистки определяется по формулам:

– при окраске:

$$M_{\text{ок}}^{\text{х}} = m'_{\text{к}} \cdot f_{\text{р}} \cdot \sigma'_{\text{р}} \cdot \sigma_{\text{х}} \cdot (1 - j) \cdot 10^{-9}, \quad (2.5)$$

где $\sigma_{\text{х}}$ – содержание компонента «х» в летучей части ЛКМ, % массовые (табл. 2.3).

– при сушке:

$$M_{\text{суш}}^X = m'_X \cdot f_p \cdot \sigma_p'' \cdot \sigma_X \cdot (1 - j) \cdot 10^{-9}, \quad (2.6)$$

– общий выброс по каждому компоненту летучей части ЛКМ:

$$M_{\text{общ}}^X = M_{\text{окр}}^X + M_{\text{суш}}^X, \quad (2.7)$$

Таблица 2.3

Состав лакокрасочных материалов (выборочно)

Вид ЛКМ	Марка	Доля летучей части (растворителя), f_p %	Наименование	Содержание компонента «х» в летучей части ЛКМ σ_x , %
Шпатлевки	ПФ-002	25	Сольвент	100
	НЦ-008	70	Ацетон Бутилацетат Этилацетат Спирт н-бутиловый Толуол	15 30 20 5 30
Грунтовки	АК-070	86	Ацетон Спирт н-бутиловый Ксилол	20,04 12,6 67,34
	ГФ-032	61	Сольвент	100
	ВЛ-023	74	Спирт н-бутиловый Спирт этиловый Бутилацетат Толуол Ацетон	24,06 48,71 3,17 1,28 22,78
Эмали	АС-182	47	Ксилол Уайт-спирит Сольвент	85 5 10
	НЦ-66	66	Ацетон Бутилацетат Спирт н-бутиловый Спирт этиловый Этилцеллозольв Толуол	7 10 15 15 8 45
	ПЭ-251	42	Толуол Ксилол Метилизобутилкетон Циклогексанон	5 38 38 19
	ЭП-140	53,5	Ацетон Ксилол Толуол Этилцеллозольв	33,7 32,78 4,86 28,66

Окончание табл. 2.3

Вид ЛКМ	Марка	Доля летучей части (растворителя), f_p %	Наименование	Содержание компонента «х» в летучей части ЛКМ σ_x , %
Лаки	БТ-577	63	Уайт-спирит Ксилол	42,6 57,4
	МЧ-52	38,76	Спирт н-бутиловый Спирт этиловый Сольвент Формальдегид	85 2,6 10,4 2
	ПЭ-220	35	Ацетон Ксилол Толуол	88,57 4,29 7,14
Растворители	Р-10	100	Ацетон Ксилол	15 85
	Р-12	100	Булиацетат Толуол Ксилол	30 60 10
	Р-219	100	Ацетон Толуол Циклогексанол	33 33 34

Таблица 2.4

Выделение загрязняющих веществ при нанесении лакокрасочных покрытий

Способ окраски	Аэрозоли (процент от производительности при окраске), σ_a	Пары растворителя (процент от общего) от общего содержания растворителя в краске)	
		При окраске, σ'_p	При сушке, σ''_p
<i>Распыление:</i>			
– пневматическое;	30	25	75
– гидроэлектростатическое;	1,0	25	75
– пневмоэлектрическое;	3,5	20	80
– электростатическое;	0,3	50	50
– горячее.	20	22	78
<i>Электроосаждение</i>	–	10	90
<i>Окунание</i>	–	28	72
<i>Струйный облив</i>	–	35	65
<i>Покрытие лаком в лаконаливных машинах:</i>			
– металлических изделий;	–	60	40
– деревянных изделий.	–	80	20

При расчетах следует принимать во внимание тот факт, что в местные отсосы поступает (97÷98)% вредных веществ, остальная ее часть через неплотности укрытий трубопроводов и проемов поступает в производственные помещения.

Удельные объёмы отсасываемого воздуха при нанесении лакокрасочных покрытий (смотри в приложении В). При нанесении ЛКМ способами окраски, сопровождающимися выделениями окрасочного аэрозоля, возможно применение коэффициента его оседания (K_{oc}) для организованных источников при известной длине воздуховодов [7].

Таблица 2.5

Значение коэффициента оседания аэрозоля краски для организованных источников в зависимости от длины газозащитного тракта, K_{oc}

Наименование коэффициента	Длина воздуховода от места выделения до очистного устройства, м					Примечание
	до 2	2-5	5-10	10-15	15-20	
K_{oc}	1,0	1,0-0,8	0,8-0,5	0,5-0,3	0,3-0,1	В случае отсутствия очистного устройства длина берется от места выделения до места выброса аэрозоля краски

Примечание: Коэффициент определен при средней скорости воздуха 6-10 м/с. Коэффициент учитывается при расчете валового и максимального разового выброса аэрозоля краски.

2.2.2. Процессы сварки и резки металлов

Характеристика сварочных процессов. Сварочные цеха являются неизбежной принадлежностью большинства производственных процессов в различных видах промышленности.

В сварочных цехах встречаются следующие виды сварки: электросварка (преимущественно ручная); газовая; электродуговая автоматическая и полуавтоматическая сварка; под слоем флюса; в среде защитных газов.

Сварка ведется на специальных столах, верстаках или стендах (для крупногабаритных деталей). Иногда сварка производится на нефиксированных местах по всему помещению.

При использовании сварки *под слоем флюса* сварочная дуга защищена от воздушной среды слоем флюса и расплавленного шлака. Флюс предотвращает разбрызгивание металла и экранирует излучение дуги. Сварка под флюсом происходит голый электродной проволокой, что уменьшает выброс вредных веществ, содержащихся в покрытиях электродов.

При использовании *электродуговой сварки* в среде защитных газов. сварочная дуга и зона плавления защищены оболочкой, не взаимодействующей с расплавленным металлом и вытесняющей воздух из зоны сварки.

Наиболее распространены типы сварки: сварка с использованием диоксида углерода; контактная (точечная, стыковая, шовная) сварка.

Кроме сварки производится *резка* металла:

- тепловая резка металлов (наиболее распространена ацетилен - кислородная резка, при которой струя кислорода окисляет и выдувает расплавленный металл из зоны реза);
- плазменно-дуговая резка.

Металл проплавляется мощным дуговым разрядом. Дуга проходит между разрезаемым металлом и неплавящимся электродом (из вольфрама). Режущей средой может быть струя аргона, азота, кислорода, воздуха.

Расчет массы загрязняющих веществ при сварочных работах

Расчет массы вредных веществ от сварочного процесса [6] зависит от вида сварочного оборудования, количества израсходованного сварочного материала и удельной массы выделяющихся вредных веществ на 1 кг использованного при сварке электрода.

$$M = m \cdot n, \quad (2.8)$$

где m – удельный выброс вредных веществ, г/кг электродов (табл. 2.6); n – количество сварочных материалов (электродов), кг.

В табл. 2.6 выборочно приведены удельные показатели выделения загрязняющих веществ при сварке и наплавке металлов на единицу массы сварочного материала (подробно см. [10]).

Удельные выделения загрязняющих веществ при использовании машинной сварки и газовой сварки приведены в табл. 2.7.

Таблица 2.6

Удельные показатели выделения загрязняющих веществ при сварке и наплавке металлов на единицу массы сварочного материала
(выборочно)

Технологический процесс (операция)	Используемый материал и его марка	Наименование и удельные количества выделяемых загрязняющих веществ, г/кг									
		сварочный аэрозоль	в том числе						фтористый водород	диоксид азота	оксид углерода
			железа оксид	марганец и его соединения	хром бivalentный (в пересчете на трехокись хрома)	пыль неорганическая, содержащая SiO ₂ (20 - 70 %)	Прочие				
наименование	кол-во										
Ручная сварка штучными электродами	УОНИ-13/45	16,4	10,7	0,92	-	1,4	Фториды в пересчёте на F	3,3	0,75	1,5	13,3
	ЭА-48А/2	17,8	15,9	0,5	0,9	0,5	Титана диоксид	0,01	1,76	0,9	1,9
	НИ-ИМ-1	5,8	4,65	0,43	0,12	-	Никель и никеля оксид (в пересч. на Ni)	0,6	0,63	-	-
Полуавтоматическая сварка присадочной проволокой	ЭП-245	12,4	10,9	0,54	-	-	-	-	0,36	-	-
	ЦСК-3	13,9	12,8	1,11	-	-	-	-	0,53	-	-
Полуавтоматическая сварка порошковой проволокой	ЭП-15/2	8,4	7,52	0,88	-	-	-	-	0,77	-	-
	ПП-106	10	8,6	0,45	-	-	Титана диоксид	0,4	-	-	-
							Фториды (в пересчете на F)	0,55	-	-	-
Полуавтоматическая сварка в среде CO ₂	Св-08ХГН2МТ	7	6,61	0,2	0,1	0,02	Никель и никеля оксид (в пересч. на Ni)	0,07	-	0,8	10,6
	Св16Х16Н25М6	15	12,6	0,35	0,1	-		2			2,5
Ручная газовая сварка	В-2К	2,32	-	-	0,47	-	Кобальт	0,01	-	-	-
	С-1	3,4	-	-	0,01	-	Никель и никеля оксид (в пересч. на Ni)	0,04	-	-	-

Таблица 2.7

Удельные показатели выделения загрязняющих веществ при сварочных работах
(выборочно)

Технологический процесс (операция)	Выделяемое загрязняющее вещество	
	Наименование	Удельное количество
Контактная электросварка стали:		
стыковая и линейная	Железа оксид	24,25 г/ч на 75 кВт номинальной мощности машины
	Марганец и его соединения	0,75 г/ч на 75 кВт номинальной мощности машины
точечная	Железа оксид	2,425 г/ч на 50 кВт номинальной мощности машины
	Марганец и его соединения	0,075 г/ч на 75 кВт номинальной мощности машины
точечная, высоколегированных сталей на машинах МПТ-75, МПТ-100, МТПП-75	Сварочный аэрозоль (имеет состав свариваемых материалов)	3,5 - 5 г/ч на машину
Сварка трением	Углерода оксид	0,008 г/см ² площади стыка
Газовая сварка стали:		
ацетилен-кислородным пламенем	Диоксид азота	22 г/кг ацетилена
С использованием пропан-бутановой смеси	Диоксид азота	15 г/кг смеси
Плазменное напыление алюминия	Алюминия оксид	77,5 г/кг расходуемого порошка
Металлизация стали цинком	Цинка оксид (в пересчете на Zn)	96 г/кг расходуемой проволоки
Радиочастотная сварка алюминия	Алюминия оксид	73 г/ч на агрегат «16-76»
Дуговая металлизация при применении проволоки:		
СВ-08Г2С	Сварочный аэрозоль	18,0 - 38,0 г/кг расходуемой проволоки
	Марганец и его соединения	0,7 - 1,48 г/кг
	Пыль неорганическая, содержащая 20 - 70 % SiO ₂	0,07 - 0,16 г/кг
СВ-07Х25Н13	Сварочный аэрозоль	28,0 - 47,0 г/кг
	Марганец и его соедин.	2,1 - 3,6 г/кг
	Хром шестивалентный (в пересчете на трехокись хрома)	0,15 - 0,26 г/кг
ЭК-7	Пыль	13,0 - 17,0 г/кг
	Марганец и его соединения	0,070 г/кг

2.2.3. Гальваническое производство

Характеристика гальванического производства.

Гальванические цеха используются для нанесения покрытий на поверхности металлических изделий в различных отраслях промышленности (машиностроение, металлообработка, приборостроение и др.) и в сельском хозяйстве.

Покрытия используются для придания металлическим изделиям защитных, защитно-декоративных и функциональных свойств, обеспечивающих надежную и долговечную работу их в различных эксплуатационных условиях.

Процессы нанесения покрытий на поверхности металлических изделий связаны с протеканием электрохимических и химических реакций. В качестве электролитов и растворов для нанесения покрытий применяются концентрированные и разбавленные растворы кислот: серной, соляной, азотной, фосфорной, хромовой, их солей и др.

Разнообразие гальванических и химических процессов, применяемых при этом химических веществ, температурных режимов, обуславливает разнообразие качественного и количественного состава выделяющихся загрязняющих веществ, их агрегатных состояний.

Образование токсичных веществ при нанесении покрытий.

Технологические процессы нанесения электрохимических покрытий включают в себя ряд последовательных операций: электрохимическое или химическое обезжиривание, травление, рыхление, шлифование и полирование, декапирование, нанесение покрытий.

Все эти операции сопровождаются выделением в воздух загрязняющих веществ. Основные выделяющиеся **загрязняющие вещества**: аэрозоли щелочей, кислот, солей металлов, а также пары аммиака, оксида азота, хлористого и фтористого водорода, цианистый водород. Особой токсичностью отличаются растворы цианистых солей, хромовой и азотной кислот и др.

Расчет выбросов загрязняющих веществ. Расчет количества газообразных загрязняющих веществ *при электрохимической и химической обработке металлов*, выделяющихся с зеркала раствора данной ванны, г/с

осуществляется в зависимости от параметров ванны и способа нанесения раствора (в общем случае) по формуле [11]:

$$G^{3B} = 10^{-3} \cdot Y^{3B} \cdot F_B \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5, \quad (2.9)$$

где Y^{3B} - величина удельного выделения (удельный показатель) k -го ЗВ, выделяющегося с единицы поверхности гальванической ванны, мг/(с·м²) [11, табл. 4.2, 4.4 разд. 4 и 11 табл. 1-4 Приложения А]; F_B – площадь зеркала ванны, м²; K_1 – коэффициент укрытия ванны. При наличии в составе раствора поверхностно-активных веществ (ПАВ) $K_1 = 0,5$; при отсутствии ПАВ $K_1 = 1$; $K_2 - K_5$ – коэффициенты (см. Примечания 1 - 4 к данному подразделу).

Примечания: 1. При всех процессах электрохимии необходимо учитывать коэффициент загрузки ванны K_2 , который рассчитывается по формуле $F_2 = f_{дет}/F_{дет}$, где $F_{дет}$ – суммарная площадь поверхности обрабатываемых деталей за один час (производительность ванны по паспорту), м²; $f_{дет}$ – фактическая площадь поверхности деталей, м², обрабатываемых за один час;

2. При всех процессах электрохимии, химической обработки и обезжиривании изделий в ваннах необходимо учитывать K_3 – коэффициент заполнения объема ванны раствором: при заполнении ванны на 70 % $K_3 = 1$; при заполнении ванны на 100 % $K_3 = 1,47$, и в общем случае K_3 определяется из пропорции: $K_3/100 = X/70$, где X - фактический процент заполнения объема ванны;

3. В случае нанесения покрытий на мелкие детали насыпью в колокольных и барабанных ваннах следует учитывать коэффициент K_4 , равный: 1,5 – при покрытии в погруженных (перекидных) колоколах и барабанах; 1,8 – при покрытии в колоколах, требующих заливки электролита после каждой партии деталей;

4. При хромировании в автоматических и полуавтоматических линиях нужно умножать на коэффициент $K_5 = 0,8$.

Количество паров органических растворителей, выделяющихся при обезжиривании изделий, г/с определяется по формуле:

$$G^{3B} = 10^{-3} \cdot Y^{3B} \cdot F_B \cdot K_3 \cdot K_6 \cdot K_7, \quad (2.10)$$

где Y^{3B} – величина удельного выделения загрязняющего вещества с единицы поверхности ванны в процессе обезжиривания, мг/(с·м²) при скорости воздушного потока в помещении 0 м/с и температуре 20 °С [11, табл. 1 Приложения А]; F_B – площадь зеркала ванны, м²; K_3 – коэффициент заполнения объема ванны (см. Примечание 2); K_6 – коэффициент, зависящий от площади испарения (см. табл. 2.8); K_7 – коэффициент, зависящий от скорости и температуры воздушного потока над поверхностью испарения (см. табл. 2.9).

Таблица 2.8

Значение коэффициента K_6 , зависящего от площади испарения [11, табл. 4.5]

Площадь зеркала ванны, м ²	Коэффициент K_6	Площадь зеркала ванны, м ²	Коэффициент K_6
0,05	2,886	0,55	1,386
0,10	2,560	0,60	1,333
0,15	2,346	0,65	1,272

Окончание табл. 2.8

Площадь зеркала ванны, м ²	Коэффициент K_6	Площадь зеркала ванны, м ²	Коэффициент K_6
0,20	2,173	0,70	1,225
0,25	2,000	0,75	1,178
0,30	1,853	0,80	1,133
0,35	1,720	0,85	1,093
0,40	1,600	0,90	1,061
0,45	1,520	0,95	1,034
0,50	1,453	1,00 и более	1,000

Таблица 2.9

Значение коэффициента K_7 , зависящего от скорости воздушного потока над поверхностью испарения и температуры воздуха в помещении [11, табл. 4.6]

Скорость воздушного потока над поверхностью испарения м/с	Значение коэффициента K_7 в зависимости от температуры воздуха в помещении, в °С					
	10°	15°	20°	25°	30°	35°
0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
0,1	3,6	2,6	2,4	2,0	1,8	1,6
0,2	4,6	3,8	3,5	3,0	2,4	2,3
0,3	5,5	4,5	4,3	3,5	2,9	2,7
0,5	6,6	5,7	5,4	4,1	3,6	3,2
1,0	10,0	8,7	7,7	6,5	5,6	4,6

Примечание: Скорость воздушного потока над поверхностью испарения так относится к скорости воздушного потока в воздуховоде, как площадь сечения воздуховода относится к площади сечения ванны.

Количество загрязняющих веществ, выбрасываемых из воздуховода (без очистки) **в виде аэрозолей**, г/с определяется по формуле:

$$G_{зв} = 10^{-3} \cdot V^{зв} \cdot F_v \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5 \cdot K_8, \quad (2.11)$$

где K_8 – коэффициент, учитывающий снижение относительного содержания аэрозолей в удаляемом воздухе по пути его движения. Определяется отношением количества аэрозолей в расчетном сечении воздуховода к количеству аэрозоля, выделяющегося с зеркала раствора ванны. Коэффициент K_8 определяется из графика на [11, рис. 1].

Эмпирическая формула для расчета коэффициента K_8 :

$$K_8 = 0,65 / (l^{2/3} + 1,8), \quad (2.12)$$

где l – длина воздуховода, м.

2.2.4. Механическая обработка металлов

К механической обработке металлов относятся процессы резания и абразивной обработки, которые в свою очередь включают процессы точения, фрезерования, сверления, шлифования, полирования.

Образование загрязняющих веществ при механической обработке и резки металлов. Характерной особенностью процессов механической обработки является образование отходов в виде твердых частиц (промышленной пыли), а в случае применения смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) – аэрозолей масла и эмульсола.

Источниками образования и выделения загрязняющих атмосферу веществ являются различные металлорежущие и абразивные станки. Интенсивность образования загрязнителей зависит от следующих факторов: вида обрабатываемого материала; режима обработки; производительности и мощности оборудования; геометрических параметров инструмента и обрабатываемых изделий; от расхода СОЖ.

При определении выбросов от оборудования механической обработки металлов используются расчетные методы с применением удельных показателей выделения загрязняющих веществ. Удельные показатели выделения устанавливают как массу промышленной пыли или другого загрязняющего вещества, выделяемую в единицу времени на единицу оборудования.

Валовые выделения загрязняющих веществ при механической обработке металлов рассчитываются из нормо-часов работы станочного парка, а их поступление в атмосферу – с учетом эффективности газопылеулавливающего оборудования.

Обработка металлов без охлаждения. Наибольшим пылевыведением сопровождаются процессы абразивной обработки металлов: зачистка, полирование, шлифование и др. Образующаяся при этом пыль на (30÷40)% по массе представляет материал абразивного круга и на (60÷70)% – материал обрабатываемого изделия. При обработке войлочными и матерчатými кругами образуется войлочная (шерстяная) или текстильная (хлопковая) пыль с примесью полирующих материалов. При обработке металлических изделий на полировальных станках с

использованием пасты ГОИ выделяемая пыль имеет следующий состав (по экспертным оценкам НИИ Атмосфера) [7]: пыль оксида металла (в частности, оксид железа (код 0123) - 25%; пыль меховая (шерстяная, пуховая) (код 2920) или хлопковая (код 2917) - 10%; хрома трехвалентные соединения (в пересчете на Cr^{3+}) (код 0228) - 65%.

При полировании металлических изделий без пасты ГОИ выделяется: пыль меховая (шерстяная, пуховая) или хлопковая - до 98%; пыль оксида металла до 2%.

Обработка металлов с применением СОЖ. В ряде процессов механической обработки металлов и их сплавов применяют СОЖ, которые подразделяются на водные, масляные и специальные. Применение СОЖ сопровождается образованием тонкодисперсного масляного аэрозоля и продуктов его термического разложения. Количество выделяющегося аэрозоля зависит от: формы и размеров изделия; режимов резания; расхода и подачи СОЖ. Экспериментально установлена зависимость количества выделений масляного аэрозоля от энергетических затрат на резание металла. Удельные показатели выделений в этом случае определяются как масса загрязняющего вещества, выделяемая на единицу мощности оборудования (на 1 кВт мощности привода станка).

Расчет выбросов загрязняющих веществ при механической обработке металлов производится по [12] на основе удельных показателей. Количество загрязняющих веществ (пыли), выбрасываемых при механической обработке металлов **без применения СОЖ**, г/с определяют по формуле:

$$M_{\text{макс}} = K \cdot N \cdot L \cdot \eta \cdot (1 - j), \quad (2.13)$$

где K – удельные выделения пыли технологическим оборудованием (см. табл. 2.10), г/с; N – количество станков, шт.; η – эффективность местных отсосов (в долях единицы); j – степень очистки воздуха пылеулавливающим оборудованием (в долях единицы); L – коэффициент 20-минутного осреднения:

$$L = T_{\text{цикла}} / 20, \quad (2.14)$$

где $T_{\text{цикла}}$ – время цикла обработки, мин.

Валовый выброс пыли, выделяющейся при механической обработке металлов, т/год вычисляется по формуле:

$$M_{\text{вал}} = 3,6 \cdot M_{\text{макс}} \cdot T \cdot 10^{-3}, \quad (2.15)$$

где T – фактический годовой фонд времени работы оборудования, ч/год.

Количество загрязняющих веществ (эмульсола), выбрасываемых при механической обработке металлов в случае применения СОЖ, г/с рассчитывается по формуле:

$$M_{\text{макс}} = K_{\text{к}} \cdot N \cdot P \cdot L \cdot \eta \cdot (1 - j), \quad (2.16)$$

где $K_{\text{к}}$ – удельные показатели выделения масла и эмульсола, г/с на кВт мощности оборудования (см. табл. 2.11); N – количество станков, шт.; P – мощность установленного оборудования, кВт; η – эффективность местных отсосов (в долях единицы); j – степень очистки воздуха пылеулавливающим оборудованием (в долях единицы); L – коэффициент 20-минутного осреднения (см. ф-лу (2.14)).

Валовый выброс эмульсола (масла) вычисляется по ф-ле (2.15).

Таблица 2.10

Удельное выделение пыли (г/с) основным технологическим оборудованием при механической обработке металлов без охлаждения

Наименование технологического процесса, вид оборудования	Определяющая характеристика оборудования	Выделяющиеся в атмосферу вредные вещества, г/с		
		Пыль абразивная	Пыль металлическая	Другие виды пыли
Кругло-шлифовальные станки	Д шлиф. круга, мм:			
	400 600	0,020 0,026	0,030 0,039	–
Плоскошлифовальные станки	400 450	0,022 0,023	0,033 0,036	–
	Полировальные станки с войлочным кругом	Д войлоч. круга, мм:		
500 600		–	–	0,050 0,063
Заточные станки	Д шлиф. круга, мм:			
	500 550	0,024 0,027	0,036 0,040	–

Примечание: Состав пыли абразивной аналогичен составу материала применяемого шлифовального круга. Состав пыли металлической аналогичен составу обрабатываемых материалов.

Таблица 2.11

Удельное выделение пыли (г/с) аэрозолей масла и эмульсола при механической обработке металлов с охлаждением

Наименование технологического процесса, вид оборудования	Количество выделяющегося в атмосферу масла (эмульсола), 10^{-5} г/с на 1 кВт мощности станка
Обработка металлов на токарных, сверлильных, фрезерных, протяжных, резьбонакатных, расточных станках: – с охлаждением маслом; – с охлаждением эмульсией с содержанием эмульсола менее 3%; – с охлаждением эмульсией с содержанием эмульсола (3÷10)%.	5,6
	0,05
	0,045
Обработка металлов на шлифовальных станках: – с охлаждением маслом; – с охлаждением эмульсией с содержанием эмульсола менее 3%; – с охлаждением эмульсией с содержанием эмульсола (3÷10)%.	8
	0,104
	1,035

Примечание: При обработке металлов на шлифовальных станках выделяется пыль в количестве **10% от количества пыли** при сухой обработке (см. табл. 2.10). При использовании СОЖ, в состав которых входит триэтанолламин, выделяется 3×10^{-6} г/ч триэтанолламина на 1 кВт мощности станка.

2.3. Примеры расчёта

Пример 2.1. В окрасочном цехе предприятия расположены технологические линии окраски металлических изделий. Определить массу образовавшихся вредных веществ при окраске. *Исходные данные:* израсходовано шпатлёвки ПФ-002 = 1 кг; грунтовки АК-070 = 4 кг; эмали АС-182 = 8 кг; лака ПЭ-220 = 4 кг.

Решение:

Количество загрязняющих веществ (ЗВ), образовавшихся в виде <i>аэрозолей</i> (ф-ла (2.1))				
Вид и марка ЛКМ	m_k , кг	σ_a , % (табл. 2.4)		M_{OK}^a , кг
шпатлёвка ПФ-002	1	пневматическое распыление	30	0,3
грунтовка АК-070	4		30	1,2
эмаль АС-182	8		30	2,4
лак ПЭ-220	4	покрытие в лаконоливных машинах	60	2,4
Количество ЗВ в виде <i>паров органических растворителей</i> при окраске (ф-ла (2.2))				
Вид и марка ЛКМ	m_k , кг	f_p , % (табл. 2.3)	σ'_p , % (табл. 2.4)	$M_{OK}^{пар}$, кг
шпатлёвка ПФ-002	1	25	25	0,06
грунтовка АК-070	4	86	25	0,86
эмаль АС-182	8	47	25	0,94
лак ПЭ-220	4	35	60	0,84

Количество ЗВ в виде <i>паров органических растворителей</i> при окраске для каждого компонента ЛКМ (формула (2.2))					
Вид и марка ЛКМ	Состав ЛКМ (табл. 2.3)	Масса каждого компонента ЛКМ m_k , кг	f_p , % (табл. 2.3)	σ'_p , % (табл. 2.4)	$M_{OK}^{пар}$, кг
шпатлёвка ПФ-002	Сольвент	1	25	25	0,06
грунтовка АК-070	Ацетон	0,80	86	25	0,17
	Спирт н-бутиловый	0,50	86	25	0,11
	Ксилол	2,69	86	25	0,58
эмаль АС-182	Ксилол	6,8	47	25	0,80
	Уайт-спирит	0,4	47	25	0,05
	Сольвент	0,8	47	25	0,09
лак ПЭ-220	Ацетон	3,5428	35	60	0,74
	Ксилол	0,1716	35	60	0,04
	Толуол	0,2856	35	60	0,06

Пример 2.2. В механическом цехе предприятия размещено оборудование для механической обработки металлов с охлаждением и без него. Определить массу образовавшихся вредных веществ при механической обработке металлов.

Исходные данные по оборудованию: 3 круглошлифовальных станка диаметром шлифовального круга $d=600$ мм; 3 полировальных станка с войлочным кругом $d=600$ мм; 4 плоскошлифовальных станка $d=450$ мм с охлаждением эмульсией (содержание эмульсола 3-10%). Мощность плоскошлифовального станка $P=10$ кВт. Время цикла обработки $T_{цикла}=15$ мин. Эффективность местных отсосов $\eta=0,7$. Газоочистка отсутствует. Время работы станка в год: $T=2000$ ч.

Решение: Определяем коэффициент L по ф-ле (2.14): $L=15/20=0,75$.

Используемое оборудование	Кол-во станков	Количество выделяемых ЗВ, г/с (т/год)			
		пыль абразивная	пыль металлическая	пыль войлока и металлов	масло (эмульсол)
Круглошлифовальный станок	3	0,041 (0,295)	0,061 (0,442)	-	-
Полировальный станок	3	-	-	0,10 (0,7)	-
Плоскошлифовальный станок	4	0,005 (0,035)	0,008 (0,054)	-	0,0003 (0,0022)

Пример 2.3. В сварочном цехе предприятия производятся следующие виды сварки: ручная штучными электродами, полуавтоматическая сварка присадочной проволокой, а также полуавтоматическая сварка в среде CO_2 . Определить массу выбрасываемых вредных веществ.

Исходные данные: израсходовано штучных электродов УОНИ-13/45 = 3 кг; ЭА-48А/2 = 2 кг; НИ-ИМ-1 = 2 кг; присадочной проволоки ЦСК-3 = 1 кг; электродов Св16Х16Н25М6 = 2 кг.

Используемый материал и его марка	Количество сварочных материалов (электродов), кг	Количество выделяемых загрязняющих веществ, г									
		сварочный аэрозоль	в том числе						фтористый водород	диоксид азота	оксид углерода
			железа оксид	марганец и его соединения	хром бivalentный (в пересчете на трехокись хрома)	пыль неорганическая, содержащая SiO ₂ (20 - 70 %)	Прочие				
наименование	кол-во										
УОНИ-13/45	3	49,2	32,1	2,76	-	4,2	Фториды (в пересчёте на F)	9,9	2,25	4,5	39,9
ЭА-48А/2	2	35,6	31,8	1	1,8	1	Титана диоксид	0,02	3,52	1,8	3,8
НИ-ИМ-1	2	11,6	9,3	0,86	0,24	-	Никель и никеля оксид (в пересчёте на Ni)	1,2	1,26	-	-
ЦСК-3	1	13,9	12,8	1,11	-	-	-	-	0,53	-	-
Св16Х16Н25М6	2	30	25,1	0,7	0,2	-	Никель и никеля оксид (в пересчёте на Ni)	4	-	-	5
Итого:		140	111	6,43	2,24	5,2	Фториды (в пересчёте на F)	9,9	7,56	6,3	48,7
							Титана диоксид	0,02			
							Никель и никеля оксид (в пересчёте на Ni)	5,2			

Пример 2.3. В гальваническом цехе предприятия производятся следующие виды работ: обезжиривание деталей из меди и ее сплавов (4 ванны, заполнение на 70 % $K_3 = 1$), химическое декапирование (5 ванн, укрытие отсутствует), меднение (составом I, 4 ванны, укрытие отсутствует). Определить массу вредных веществ.

Исходные данные: площадь зеркала всех ванн принять 1,8 м². $K_7=2,6$ (при температуре воздуха в помещении 15°C и скоростью воздушного потока 0,1 м/с).

Решение: Расчёт сведён в таблицу.

Наименование технологической операции	Кол-во ванн	$F_{\text{пов}}, \text{ м}^2$	Наименование выделяющегося ЗВ	$Y^{\text{ЗВ}}, \text{ мг}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$		K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6	K_7	$G^{\text{ЗВ}}, \text{ г}/\text{с}$	
				Аэрозоль	Газовая фаза								Аэрозоль	Газовая фаза
Обезжиривание деталей из меди и ее сплавов	4	1,80	Натрия карбонат	2	-	-	-	1	-	-	1	2,6	0,037	-
			Натрия фосфат	2,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,039
Декапирование химическое	5	1,80	Кислота серная	0,15	-	1	-	1	1,5	-	-	-	0,002	-
Меднение	4	1,8	Водород цианистый	1,5	0,5	1	-	1	1,5	-	-	-	0,02	0,005

3. ЗАЩИТА ВОЗДУШНОГО БАССЕЙНА ОТ ВЫБРОСОВ СТАЦИОНАРНЫХ ТОПЛИВОСЖИГАЮЩИХ УСТАНОВОК

В современных условиях низкого качества окружающей среды неизбежно возникает необходимость обеспечения экологической безопасности любых объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду, в том числе воздушный бассейн. Это прежде всего относится к топливосжигающим установкам, использующим органическое топливо.

Способы снижения загрязнения воздушного бассейна можно разделить на информационно – пропагандистские, законодательно-нормативные, административно-организационные и технические.

Наиболее действенными с позиции защиты воздушного бассейна оказываются технические методы, которые следует разделить на две крупные группы: *технологические* методы и методы *очистки*.

Очистка – это применение способов улавливания или нейтрализации загрязняющих веществ, желательна с утилизацией уловленных продуктов в технологических целях. Методы очистки имеют, как правило, высокую стоимость, и поэтому перед их выбором необходимо рассмотреть все возможности использования *технологических* методов для снижения вредных выбросов в атмосферу.

Технологические методы – это комплекс технологических решений и режимов работы технологического оборудования, которые направлены на *снижение образования* токсичных веществ в данном технологическом процессе. Технологические методы менее затратные, чем очистка.

3.1. Технологические методы снижения загрязнения атмосферы топливосжигающими установками

Технологические методы снижения загрязнения атмосферы выбросами стационарных топливосжигающих установок можно классифицировать так:

- повышение доли использования топлив с высокими экологическими характеристиками в топливном балансе;
- снижение расхода топлива путем повышения эффективности сжигания

и снижения потерь теплоты при ее транспортировке и использовании;

- использование энергосберегающего оборудования;
- энерготехнологическая переработка твердых топлив;
- эффективное оборудование для выведения вредных выбросов с целью их рассеивания в атмосфере;
- использование методов подавления образования вредных веществ при сжигании различных видов топлива.

Рассмотрим некоторые из технологических методов, позволяющих снижать уровень загрязнения атмосферы.

3.1.1. Снижение расхода топлива путем повышения эффективности сжигания и снижения потерь теплоты при ее транспортировке и использовании

Расход органического топлива для каждого технологического процесса зависит от потребности в тепловой энергии, теплоты сгорания топлива и коэффициента полезного действия теплогенерирующей установки, м³/с (кг/с):

$$B = \frac{Q_T}{Q_i^r \cdot \eta_{бр}^k} \cdot 100, \quad (3.1)$$

где Q_T - требуемое количество теплоты, кВт; Q_i^r - теплота сгорания топлива низшая, кДж/м³, (кДж/кг); $\eta_{бр}^k$ - коэффициент полезного действия установки, %.

Анализ формулы показывает, что необходимо применять топливо с высокой теплотой сгорания, а также использовать топливосжигающие установки с высоким коэффициентом полезного действия (КПД).

КПД ($\eta_{бр}^k$) по методу обратного баланса, %:

$$\eta_{бр}^k = 100 - q_2 - q_3 - q_4 - q_5 - q_6, \quad (3.2)$$

где q_2 - потери теплоты с уходящими газами, %; q_3 - потери теплоты от химической неполноты сгорания, %; q_4, q_6 - потери теплоты соответственно от механической неполноты сгорания и с теплотой шлаков, %; q_5 - потери теплоты через обмуровку, %.

Даже в лучших производственно-отопительных котельных потери теплоты с уходящими газами (q_2) достаточно велики: (4–8)% теряется с физической теплотой уходящих газов - (q_2).

Наиболее высокие потери (q_2) имеют место при сжигании топлива в

промышленных печах без утилизации продуктов сгорания – более 50%. Эффективным способом их снижения является комплексное использование топлива, в том числе ступенчатое сжигание. В этом случае продукты сгорания из высокотемпературной установки (печи) поступают в низкотемпературную, например сушильную установку (см. рис. 3.1).

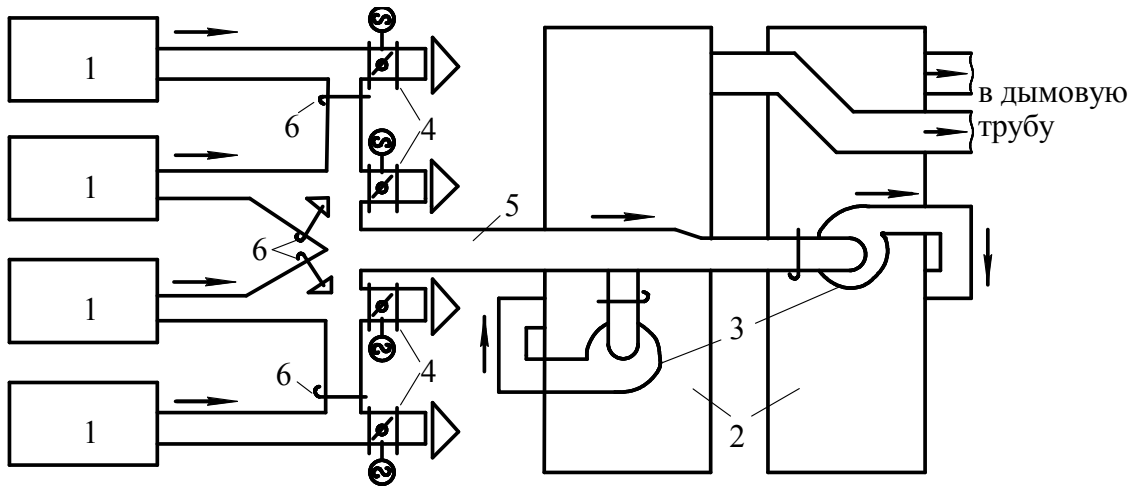


Рис. 3.1. Комплексная установка использования топлива: 1 - термические печи; 2 – сушилки; 3 – дымососы; 4 – заслонки с электроприводом; 5 – газоход; 6 - шибер

Кроме того, (10-13)% выработанной теплоты теряется в существующих топливосжигающих установках со скрытой теплотой образования водяных паров. Это обусловлено тем, что низкотемпературные поверхности топливосжигающих установок и дымовая труба выполнены из материалов, подверженных коррозии (сталь, чугун), что вынуждает специалистов поддерживать температуру уходящих газов выше температуры точки росы водяных паров. Перспективны 2 способа повышения КПД:

- выполнение низкотемпературных поверхностей нагрева из неметаллических материалов;
- использование энергосберегающего оборудования, позволяющего сконденсировать водяные пары внутри установки, используя теплоту конденсации для нагрева теплоносителей.

Снижения потерь теплоты от химической неполноты сгорания q_3 можно добиться путем периодического проведения режимно-наладочных испытаний и организацией надлежащего контроля за процессом сжигания

топлива. *Исключить потери* теплоты q_4 и q_6 следует применением природного газа в качестве топлива или совершенными топочными камерами, а снизить потери q_5 – *герметизацией поверхностей* газового тракта.

Для повышения КПД нетто следует совершенствовать тепловую схему котельной, т.е. использовать *сепараторы непрерывной продувки, выпар* из деаэратора, применять совершенное вспомогательное оборудование – *пластинчатые теплообменники* и др. Следует непрерывно контролировать и устранять *утечки* теплоносителей через фланцы трубопроводов, насосов, теплообменников и другого оборудования котельной.

3.1.2. Применение энергосберегающего оборудования для глубокого использования теплоты уходящих газов

В топливосжигающих установках могут быть использованы некоторые виды оборудования, позволяющего использовать теплоту конденсации водяных паров, содержащихся в продуктах сгорания. Рассмотрим динамику развития конденсационных теплообменников.

Первыми из группы конденсационных аппаратов появились *контактные экономайзеры*. В настоящее время они выпускаются (АООТ «Газоаппарат», г. Хунджанд) 2-х типов - ЭК-БМ-1.1 мощностью 0,36 МВт и ЭК-БМ- 1,2 мощностью 1,2 МВт.

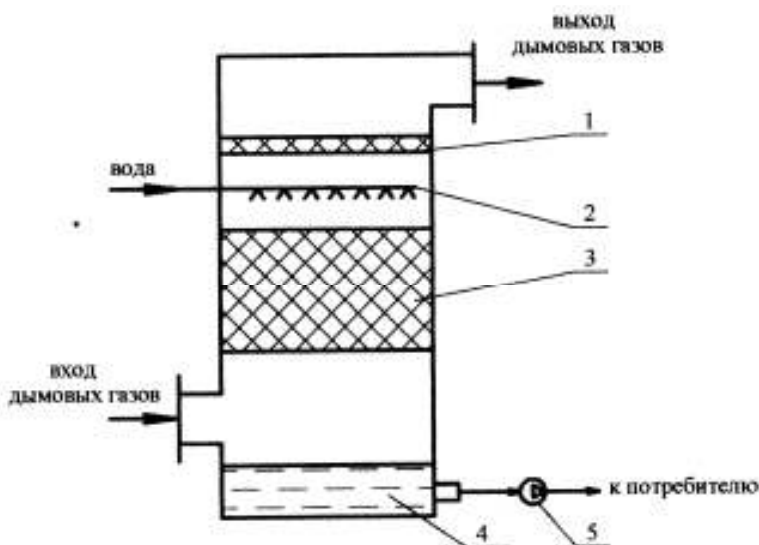


Рис. 3.2. Схема контактного экономайзера типа ЭК – БМ: 1 – каплеулавливающий слой; 2 – оросительная труба; 3 – насадка (кольца Рашига); 4 - нагретая вода, 5 - насос нагретой воды

В контактных экономайзерах (рис. 3.2) глубокое охлаждение продуктов сгорания осуществляется за счет их орошения нагреваемой водой.

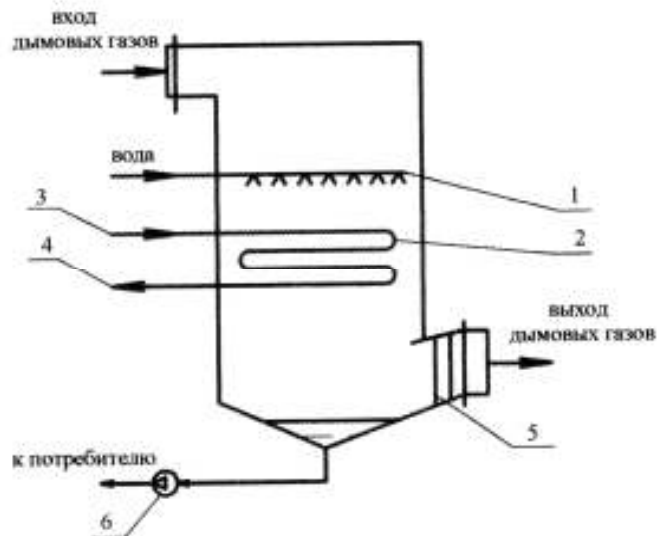
Основной недостаток контактных экономайзеров заключается в следующем. Вода, нагретая в процессе непосредственного контакта с дымовыми газами, приобретает коррозионно-активные свойства в результате поглощения CO_2 и O_2 , содержащихся в продуктах сгорания всех видов топлива. Необходимость деаэрации «контактной» воды усложняет схему её использования. Кроме того, качество нагретой воды зависит от степени чистоты продуктов сгорания, поэтому такая вода используется для технологических целей.

Недостаток контактных экономайзеров частично устранен в аппаратах *КТАН* (*контактные теплообменники с активной насадкой*) и в *теплоутилизаторах АЭ* (*автономные экономайзеры*).

В этих аппаратах исходная вода нагревается двумя способами – контактным и поверхностным. Наиболее используемый КТАН-08 (рис. 3.3) выпускается в настоящее время (АООТ «Газоаппарат», г. Хунджанд).

Рис. 3.3. Схема контактного теплообменника с активной насадкой (КТАН):

1 – оросительное устройство; 2 – теплообменник из гладких труб; 3 – вход воды в поверхностный теплообменник; 4 – выход нагретой воды; 5 – каплеуловитель; 6 – насос



В аппаратах КТАН часть нагреваемой воды подается на орошение поверхности встроенного теплообменника, т.е. непосредственно контактирует с продуктами сгорания и зависит от их качества (аналогично нагреваемой воде в контактном экономайзере).

Другая часть нагреваемой воды проходит внутри трубок поверхностного теплообменника, т.е. не контактирует с продуктами сгорания и не изменяет свой химический состав. Теплообменник выполняет роль активной насадки, так как

его поверхность активно участвует в процессе теплопередачи от продуктов сгорания к воде, циркулирующей по трубкам (в отличие от керамической насадки контактного экономайзера).

Теплоутилизаторы АЭ по сравнению с ЭК-БМ-1 и КТАН обладают рядом преимуществ: квадратная форма поперечного сечения обеспечивает лучшую компоновку с основным топливопотребляющим оборудованием, а также наличие встроенного насадочного декарбонизатора воды. «Контактная» вода, обработанная таким образом, хотя и не будет соответствовать параметрам питьевой воды, однако позволит избежать коррозии трубопроводов и оборудования.

Недостатки перечисленных теплообменников ЭК-БМ, КТАН и АЭ:

- часть воды, имеющая непосредственный контакт с дымовыми газами, можно использовать только на технологические нужды;
- громоздки и сложны в эксплуатации;
- сравнительно низкая температура нагрева воды, не превышающая (при использовании теплоты уходящих газов котлов) 50-60°C.

Радикальным способом устранения недостатков этих аппаратов является использование конденсационных теплообменников **калориферного** типа с использованием биметаллических калориферов КСк, которые выпускает ООО «Костромской машиностроительный завод» (рис. 3.4).

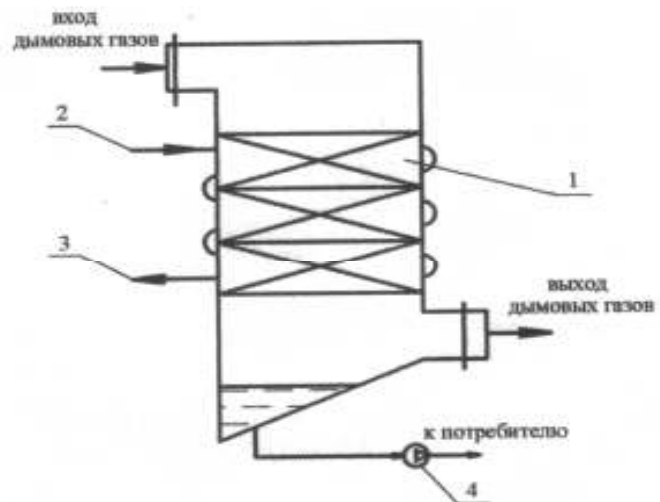


Рис. 3.4. Схема конденсационного теплообменника калориферного типа:
1 – калориферные секции; 2 – вход нагреваемой воды; 3 – выход нагретой воды, 4 – насос

Поверхность теплообмена этих аппаратов набирается из блоков калориферных секций и развита значительно больше по сравнению с гладко-

трубными КТАН. Конденсационные теплообменники калориферного типа могут иметь такой же высокий КПД, как и теплообменники контактного типа, а отсутствие непосредственного контакта нагреваемой воды с продуктами сгорания не влияет негативно на её качество. Кроме того, конденсационные теплообменники калориферного типа являются менее металлоёмкими, чем ранее рассматриваемые аппараты. Использование калориферов типа КСк в антикоррозионном исполнении (биметаллические трубы выполнены с алюминиевым накатным оребрением) позволяет снизить их коррозию.

Технические характеристики теплоутилизаторов КСк приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Основные технические характеристики калориферов КСк

Марка калорифера	Производительность		Площадь поверхности теплообмена, м ²	Габаритные размеры, мм	Масса, кг
	по воздуху, м ³ /час	по теплу кВт			
КСк-3-6	2500	50,7	13,8	602x575x180	34
КСк-3-7	3150	65,4	17,0	725x575x180	40
КСк-3-8	4000	83,2	20,2	852x575x180	45
КСк-3-9	5000	103,5	23,4	977x575x180	50
КСк-3-10	6300	135,6	29,8	1227x575x180	61
КСк-3-11	16000	360,0	86,4	1727x1075x180	158
КСк-3-12	25000	556,7	130,3	1727x1575x180	233
КСк-4-6	2500	59,1	18,1	602x575x180	41
КСк-4-7	3150	76,1	22,3	725x575x180	48
КСк-4-8	4000	97,0	26,5	852x575x180	55
КСк-4-9	5000	120,9	30,8	977x575x180	61
КСк-4-10	6300	157,6	39,2	1227x575x180	78
КСк-4-11	16000	417,7	114,5	1727x1075x180	201
КСк-4-12	25000	648,4	172,9	1727x1575x180	298

Общим недостатком всех методов утилизации теплоты уходящих газов с экологических позиций является снижение температуры выбрасываемых продуктов сгорания, и как следствие, ухудшение их рассеивания в атмосфере.

Однако этот недостаток с лихвой перекрывается экологическим эффектом

от установки *конденсационных* аппаратов. В результате повышения КПД нетто снижается расход топлива, как следствие достигается:

- сокращение негативного воздействия газодобывающих технологий на почву, растительность и водоемы эквивалентно сэкономленному топливу;
- снижение парникового эффекта вследствие уменьшения выброса CO₂;
- сокращение теплового загрязнения атмосферы в результате снижения расхода и температуры уходящих газов;
- снижение платы за загрязнение атмосферного воздуха в результате сокращения валового выброса токсичных веществ.

Кроме того, в зоне конденсации водяных паров происходит частичная очистка продуктов сгорания от растворимых в воде веществ, в т.ч. токсичных.

3.1.3. Эффективное выведение вредных выбросов в атмосферу

Одним из технологических методов снижения воздействия выбросов котельных установок считается выведение их на определенную высоту с целью разбавления атмосферным воздухом до неопасных величин. Поэтому высота дымовой трубы рассчитывается не только с учетом рассеивания токсичных веществ в атмосферном воздухе, но и с учетом фоновых концентраций. При этом в случае выброса веществ, обладающих суммацией воздействия (NO₂+SO₂), используются приведенные концентрации вредных веществ.

Высота дымовой трубы H , м с *учётом фоновых концентраций* определяется по формулам:

- при сжигании природного газа (в рабочей массе топлива отсутствует сера, а в воздухе содержатся фоновые концентрации SO₂):

$$H = \sqrt{\frac{A \cdot M_{\text{NO}_2} \cdot F \cdot m \cdot n \cdot \eta}{\left(\text{ПДК}_{\text{NO}_2} - c_{\text{NO}_2}^{\phi} - \frac{\text{ПДК}_{\text{NO}_2}}{\text{ПДК}_{\text{SO}_2}} c_{\text{SO}_2}^{\phi} \right) \cdot \sqrt[3]{V_{\text{yx}} \cdot \Delta T}}}, \quad (3.3)$$

- при сжигании мазута и твердого топлива, содержащих серу в рабочей массе и заданных фоновых концентраций:

$$H = \sqrt{\frac{A \cdot \left(M_{\text{SO}_2} + \frac{\text{ПДК}_{\text{SO}_2}}{\text{ПДК}_{\text{NO}_2}} M_{\text{NO}_2} \right) \cdot F \cdot m \cdot n \cdot \eta}{\left(\text{ПДК}_{\text{SO}_2} - c_{\text{SO}_2}^{\phi} - \frac{\text{ПДК}_{\text{SO}_2}}{\text{ПДК}_{\text{NO}_2}} c_{\text{NO}_2}^{\phi} \right) \cdot \sqrt[3]{V_{\text{yx}} \cdot \Delta T}}}, \quad (3.4)$$

Высоту дымовой трубы H , м *без учёта фоновых концентраций* можно определить по формулам:

а) при сжигании природного газа

$$H = \sqrt{\frac{A \cdot M_{\text{NO}_2} \cdot F \cdot m \cdot n \cdot \eta}{\text{ПДК}_{\text{NO}_2} \cdot \sqrt[3]{V_{\text{yx}} \cdot \Delta T}}}; \quad (3.5)$$

б) при сжигании мазута и твердого топлива

$$H = \sqrt{\frac{A \cdot \left(M_{\text{SO}_2} + \frac{\text{ПДК}_{\text{SO}_2}}{\text{ПДК}_{\text{NO}_2}} M_{\text{NO}_2} \right) \cdot F \cdot m \cdot n \cdot \eta}{\text{ПДК}_{\text{SO}_2} \cdot \sqrt[3]{V_{\text{yx}} \cdot \Delta T}}}; \quad (3.6)$$

где A – коэффициент, зависящий от температурной стратификации атмосферы. Значение коэффициента A соответствует неблагоприятным метеоусловиям (при которых концентрация вредных веществ в атмосферном воздухе максимальна). Принимается в зависимости от географической широты местности (для Нижегородской области $A=160$); M_{NO_2} – масса диоксида азота, г/с (см. ф-лу (1.31) для природного газа или ф-лу (1.37) для мазута); F – безразмерный коэффициент, учитывающий скорость оседания вредных веществ в атмосфере. Для газообразных вредных веществ, не подчиняющихся закону Стокса и мелкодисперсных аэрозолей (пыли, золы и т.п., скорость упорядоченного оседания которых практически равна нулю): $F=1$; m и n – коэффициенты, учитывающие условия выхода смеси из устья источника (для котельной установки с котлами малой и средней мощности $m, n \approx 1$); η – безразмерный коэффициент, учитывающий рельеф местности: $\eta=1$ при уклоне местности не превышающем 50 м на 1 км; ПДК – максимально-разовая предельно допустимая концентрация вредного вещества, мг/м³ (см. прил. А данного пособия); V_{yx} – расход продуктов сгорания, м³/с; ΔT – разность между температурой выбрасываемой смеси θ_{yx} и температурой окружающего воздуха $t_{\text{н}}$, °С:

$$\Delta T = \theta_{\text{yx}} - t_{\text{н}}, \quad (3.7)$$

где θ_{yx} – температура выбрасываемой смеси (температура продуктов сгорания): при сжигании природного газа $\theta_{\text{yx}} = 120 \div 140^\circ\text{C}$; при сжигании мазута $\theta_{\text{yx}} = 160 \div 230^\circ\text{C}$ (в зависимости от содержания серы в рабочей массе топлива); $t_{\text{н}}$ – температура окружающего воздуха, °С. Для зимнего периода $t_{\text{н}}$ принимается равной средней температуре наиболее холодного месяца (января); для летнего периода – равной средней максимальной температуре воздуха наиболее тёплого месяца. Для Нижнего Новгорода $t_{\text{н}}^3 = -11,8^\circ\text{C}$; $t_{\text{н}}^1 = +23,5^\circ\text{C}$ согласно (СНиП 23-01-99* Строительная климатология).

Расход продуктов сгорания, м³/с определяется по формуле:

$$V_{\text{yx}} = B_{\text{KV}} \cdot (V_{\text{r}}^0 + 1,0161 \cdot (\alpha_{\text{yx}} - 1) \cdot V_{\text{b}}^0) \cdot (\theta_{\text{yx}} + 273,15) / 237,15, \quad (3.8)$$

где B_{KV} – расчётный расход топлива котельной установкой, м³/с (кг/с); V_{r}^0 – теоретический объём продуктов сгорания, м³/м³ (м³/кг); α_{yx} – коэффициент избытка воздуха на выходе из дымовой трубы; V_{b}^0 – теоретический объём воздуха, м³/м³ (м³/кг).

Высота дымовой трубы рассчитывается для зимнего и летнего периодов, затем принимается наибольшее значение.

3.1.4. Методы подавления образования вредных веществ при сжигании топлива

Эти методы иначе называют ***технологическими***, так как снижения образования токсичных веществ добиваются за счёт специальной организации процесса горения углеводородного топлива.

Технологические методы снижения образования оксида углерода, сажи, бенз(а)пирена

Оксид углерода (СО), сажа и бенз(а)пирен образуются в процессах неполного сгорания топлива. Следовательно, оптимальным и менее затратным методом снижения их выброса в атмосферу является обеспечение полноты сгорания топлива. При проектировании систем сжигания топлива и пуске энергетического оборудования закладывается обеспечение полноты сгорания всех видов топлива. Однако в процессе эксплуатации ввиду износа оборудования и недостаточной квалификации обслуживающего персонала многие энергетические установки выбрасывают в воздушный бассейн продукты неполного сгорания: СО, сажу, бенз(а)пирен.

Причины неполного сгорания топлива могут быть обусловлены: общим недостатком окислителя; локальным недостатком окислителя; пониженной температурой в топочной камере; недостаточным временем пребывания продуктов сгорания в высокотемпературной части топки.

Общий недостаток окислителя имеет место в том случае, когда:

- параметры установленного дутьевого вентилятора не соответствуют расчетным данным (меньшие производительность и напор);
- крыльчатка дутьевого вентилятора имеет «обратное» вращение, то есть воздуха поступает недостаточно для горения ввиду неверного подключения вентилятора к электросети.

Локальный недостаток окислителя имеет место в тех случаях, когда вентилятор подает в топочную камеру достаточное количество воздуха, но распределение воздуха неравномерное, т.е. в одних точках топочного пространства наблюдается избыток воздуха, а в других - недостаток.

При сжигании *мазута* наиболее частой причиной локального недостатка окислителя является *неудовлетворительное состояние мазутного хозяйства*. Чтобы надежно обеспечить полноту сжигания мазута, в мазутном хозяйстве должно быть установлено и эффективно работать следующее оборудование:

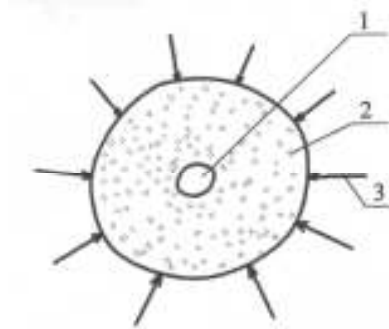
- фильтры грубой очистки мазута от твердых частиц;
- теплообменники для нагрева мазута до расчетных температур;
- фильтры тонкой очистки мазута от твердых частиц.

При отсутствии или неэффективной работе фильтров загрязняющие мазут *твёрдые* частицы проскакивают в форсунку и забивают часть отверстий. В результате высокого теплового напряжения топочного объема и излучения на входное отверстие форсунки происходит закоксовывание (частичное или полное) этих отверстий. Как следствие, мазут распыливается неравномерно по топочной камере, причем капли мазута имеют разные размеры.

Как известно, капля мазута в топочной камере претерпевает следующие изменения (рис.3.5): испарение капли мазута; горение паров мазута; догорание коксового остатка.

При недостаточно эффективном распыливании мазута последняя стадия - догорание коксового остатка - не успевает завершиться и твердые частицы в виде сажи выбрасываются в воздушный бассейн.

Рис. 3.5. Стадии горения капли мазута:
1 – капля мазута; 2 – пары мазута; 3 - подвод окислителя



Основное свойство мазута, негативно влияющее на процесс распыливания, – *высокая вязкость*.

Для снижения вязкости мазута до величин, достаточных с точки зрения транспортировки и эффективного распыливания в топке, в топливном хозяйстве устанавливаются *подогреватели* мазута. Конечная степень подогрева топлива

определяется маркой мазута. Чем выше марка мазута, тем больше его вязкость и, как следствие, – температура подогрева. В зависимости от вязкости мазута температура нагрева варьируется в пределах 90 – 120 °С.

Нагретый мазут транспортируется в помещение котельной. При этом необходимо, чтобы температура мазута, достигнутая в подогревателях топливного хозяйства, сохранялась, т.е. отсутствовали потери теплоты при транспортировке в котельную. Это достигается путем заключения мазутопроводов (подающего и обратного) в общую изоляцию с паропроводом (рис. 3.6).

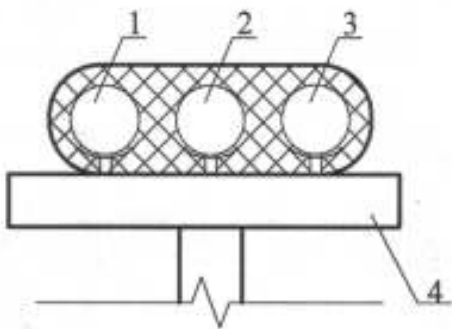
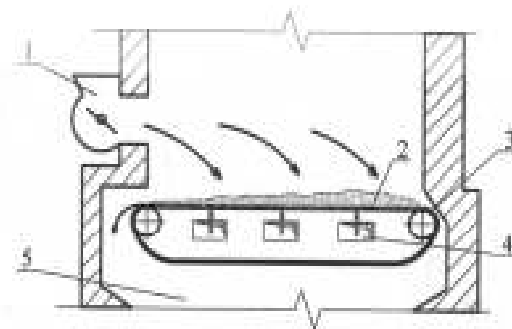


Рис. 3.6 Транспортировка мазутопроводов в котельную: 1- мазутопровод; 2 – паропровод; 3 – обратный мазутопровод; 4 – опорная конструкция

При сжигании **твёрдого топлива** неполнота сгорания также связана с химическим составом и свойствами твердого топлива. Процесс сжигания твердого топлива проходит по стадиям: нагрев топлива и выход летучих; горение летучих; выгорание коксового остатка. Если последние стадии окажутся незавершенными, произойдет выброс продуктов неполного сгорания в атмосферу.

Рис. 3.7. Топочная камера с цепной решеткой обратного хода и механическим забрасывателем топлива: 1- подача топлива; 2 – слой топлива; 3 – ленточное полотно; 4 – подвод окислителя; 5 – поддувальное пространство; 6- шлаковый бункер



Основными причинами неполноты сгорания из-за локального недостатка окислителя при сжигании твердого топлива являются:

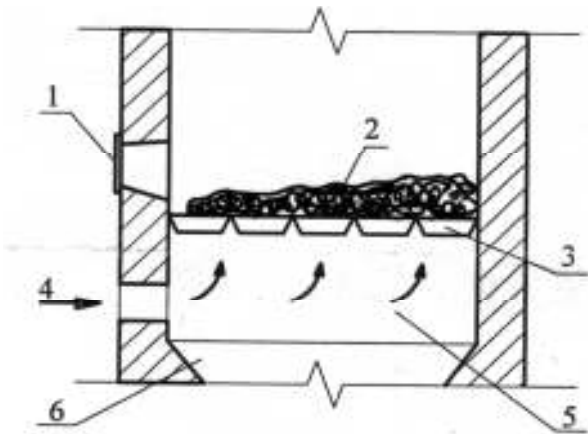
– большая разница *фракционного состава* твердого топлива (куски угля разного размера одновременно забрасываются на колосниковое полотно (рис. 3.7) или колосниковую решетку (рис. 3.8);

– неравномерное *распределение* твердого топлива по колосниковому полотну (см. рис. 3.7) или колосниковой решетке (см. рис. 3.8).

В этих случае толщина слоя окажется разной, и, следовательно, воздух будет поступать неравномерно. Причем, в том месте, где слой топлива тоньше, воздуха поступит значительно больше из-за меньшего аэродинамического сопротивления, то есть будет наблюдаться избыток окислителя.

Рис. 3.8. Топочная камера с неподвижной колосниковой решеткой и ручной подачей топлива:

1 – отверстие для заброса топлива; 2 – слой топлива; 3 – колосник; 4 – подвод окислителя; 5 – поддувальное пространство, 6 – шлаковый бункер



Наоборот, где слой топлива больше среднего по колосниковому полотну (или колосниковой решетке), воздуха поступит меньше по причине большего аэродинамического сопротивления, т.е. обнаружится недостаток окислителя.

При сжигании *газообразного* топлива локальный недостаток окислителя будет наблюдаться при недостаточно эффективном перемешивании газозвушной смеси. Причиной может стать повреждение горелочного устройства в процессе длительной эксплуатации (прогар, искривление воздухонаправляющих устройств и др.) под влиянием повышенного теплового напряжения топочного объема.

Пониженная температура в топочной камере имеет место при низкой тепловой нагрузке теплогенератора или работе котлоагрегата с большими коэффициентами избытка воздуха в топке.

В связи с этим необходимо (во избежание химической неполноты сгорания) устанавливать тепловую нагрузку теплогенераторов не менее 60% номинальной. Особое внимание надо уделять оптимальным значениям коэффициента избытка воздуха в топке.

Недостаточное время пребывания продуктов сгорания в высокотемпературной части топочной камеры возникает в следующих случаях:

- при повышении теплового напряжения топочного объема выше номинальных значений;
- при работе котлоагрегата с повышенными коэффициентами избытка воздуха в топочной камере.

Повышение теплового напряжения топочного объема выше номинальных значений может иметь место при зашлакованных или загрязненных поверхностях нагрева котла, когда оператор пытается достигнуть необходимой теплопроизводительности котлоагрегата за счет увеличения расхода топлива.

Режимно-наладочные испытания котлов – способ снижения выбросов СО, сажи, бенз(а)пирена.

Режимно-наладочные испытания котлов проводятся специализированными организациями с целью достижения максимального теплотехнического КПД котлоагрегата при работе на различных тепловых нагрузках.

Испытания осуществляются в несколько этапов. *Первый этап* испытаний – так называемая «*фотография*» котлов, т.е. выявление характеристик работы теплогенераторов и вспомогательного оборудования котельной на существующее положение. В процессе этого этапа устанавливаются все недостатки в работе котельной и разрабатывается последовательность их устранения.

Как правило, основной недостаток – завышенные потери теплоты при производстве тепловой энергии – q_2 , q_3 , q_5 и на собственные нужды котельной. Они приводят к повышению расхода топлива на единицу тепловой энергии и, как следствие, увеличению выброса всех токсичных веществ с продуктами сгорания. С экологической точки зрения, (q_2) и (q_5) приводят к возрастанию теплового загрязнения атмосферы, а (q_3) - к выбросу в воздушный бассейн продуктов неполного сгорания, в том числе токсичных - СО, сажи, БП.

Второй этап – устранение недостатков. Это герметизация газо-воздушного тракта котельной установки с целью устранения ненужных подсосов воздуха; герметизация основного и вспомогательного оборудования для снижения утечек теплоносителя; ремонт и модернизация топливосжигающих устройств и др.

Третий этап – собственно наладка оптимальных параметров работы котлов на различных режимах с максимальным теплотехническим КПД.

Заключительный этап теплотехнических испытаний котлов – разработка *режимных карт* и графических зависимостей потерь теплоты и КПД котлов при работе на различных тепловых нагрузках котлоагрегата.

Основные условия достижения высокого КПД котла (при испытаниях по методу обратного теплового баланса): минимально возможные потери теплоты

с уходящими газами (q_2) и от наружного охлаждения поверхностей нагрева котлоагрегатов(q_5); отсутствие потерь теплоты от химической неполноты сгорания (q_3) при сжигании всех видов топлива и механической неполноты сгорания(q_4) при сжигании жидкого и твердого топлива.

Как правило, теплотехнические испытания котлов осуществляются на четырех–пяти тепловых нагрузках котла. В режимной карте отражаются основные параметры работы котлоагрегата на указанных режимах и приводится состав продуктов сгорания.

Перечисленные параметры при работе на газовом топливе приведены в режимной карте, представленной в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Режимная карта парового котла ДКВр-10/13, установленного в котельной ОАО «АПЗ», при работе на природном газе с $Q_i^r = 33,41 \text{ МДж/м}^3$ с горелками ГМГм-5,7/7

№ пп	Наименование параметров	Ед. изм.	Нагрузка, %				
			65 %	81 %	94 %	102 %	117 %
1.	Выработка пара	т/ч	6,54	8,10	9,41	10,18	11,67
2.	Давление пара в барабане	кг/см ²	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0
3.	Расход газа на котел	м ³ /ч	529	652	756	819	946
4.	Температура питательной воды до экономайзера	°С	70	70	70	70	70
5.	Давление воздуха перед горелками	кгс/м ²	8	17	21	26	36
6.	Давление газа перед горелками	кгс/м ²	50	85	100	120	160
7.	Разрежение: - в топке	кгс/м ²	2,0÷3,0	2,0÷3,0	2,0÷3,0	2,0÷3,0	2,0÷3,0
	- за котлом	кгс/м ²	18	22	25	28	35
	- за экономайзером	кгс/м ²	20	28	32	37	46
8.	Состав продуктов сгорания:						
	- за котлом: - CO ₂	%	8,4	9,0	9,2	9,2	9,4
	- O ₂	%	6,1	5,0	4,6	4,6	4,2
	- за экономайзером: - CO ₂	%	7,6	8,0	8,2	8,2	8,4
	- O ₂	%	7,5	6,8	6,4	6,4	6,1
	- CO	ppm	0	0	0	0	0
	- CO	мг/м ³	0	0	0	0	0
	- NO _x	ppm	53	62	68	73	96
- NO _x	мг/м ³	110	122	131	141	180	
9.	Коэффициент избытка воздуха						
	- за котлом α_k	б.р.	1,36	1,28	1,25	1,25	1,22
	- за экономайзером $\alpha_{вэ}$	б.р.	1,50	1,43	1,40	1,40	1,36
10.	Температура уходящих газов						
	- за котлом	°С	232	269	284	296	335
	- за экономайзером	°С	115	120	125	128	148

№ пп	Наименование параметров	Ед. изм.	Нагрузка, %				
			65 %	81 %	94 %	102 %	117 %
11.	Потери теплоты с уходящими газами q_2	%	5,49	5,55	5,70	5,86	6,83
12.	Потери теплоты в окружающую среду q_5	%	2,62	2,09	1,80	1,66	1,44
13.	КПД котла ($\eta^{ор}_{ка}$)	%	91,89	92,36	92,50	92,48	91,73
14.	Расход условного топлива на выработку 1 ГДж теплоты	$\frac{кг\ у.т.}{ГДж}$	37,13	36,94	36,89	36,90	37,20

Режимная карта составляется для каждого котлоагрегата. Основным показателем эффективной работы котельной установки является удельный расход топлива на единицу выработанной тепловой энергии.

Ниже представлены графические зависимости потерь теплоты и КПД теплогенераторов от коэффициента избытка воздуха и тепловых нагрузок котлов (см. рис. 3.9 - рис. 3.14).

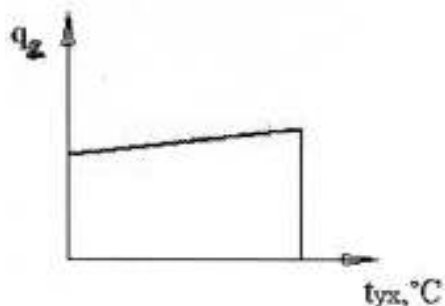


Рис. 3.9. Зависимость q_2 от температуры уходящих газов $t_{ух}$

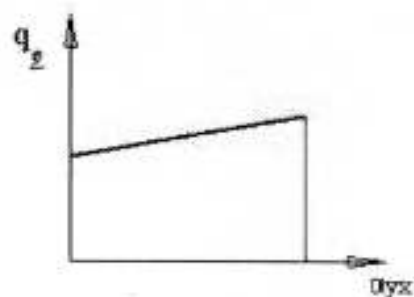


Рис. 3.10. Зависимость q_2 от коэффициента избытка воздуха $\alpha_{ух}$

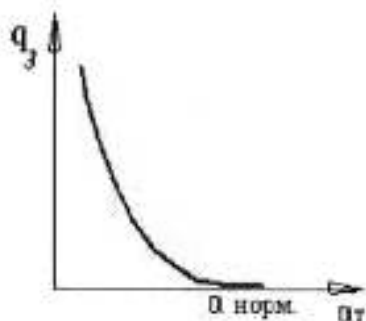


Рис. 3.11 Зависимость q_3 от коэффициента избытка воздуха в топке α_t

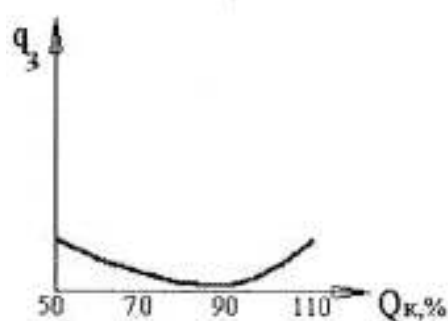


Рис. 3.12. Зависимость q_3 от тепловой нагрузки котла Q_k

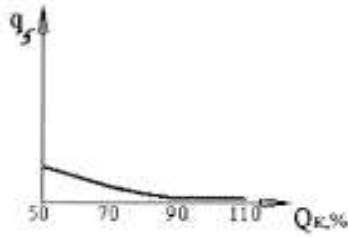


Рис. 3.13. Зависимость q_5 от тепловой нагрузки котла Q_k

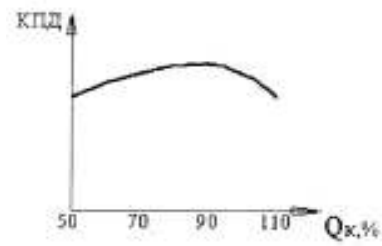


Рис. 3.14. Зависимость КПД котла от тепловой нагрузки котла Q_k

В последние годы в связи с актуальностью экологических разработок и наличием совершенной измерительной техники технологические карты энергетического оборудования стали дополняться его *экологическими характеристиками*.

Эколого-технологические режимные карты содержат информацию о количестве и компонентном составе токсичных веществ, выбрасываемых с продуктами сгорания на каждом режиме работы котельного агрегата. В процессе обработки проведенных замеров составляются графики зависимости выброса токсичных веществ от режима работы котельного агрегата и параметров котла.

Усредненные графические зависимости выброса токсичных веществ от коэффициента избытка воздуха в топке и тепловой нагрузки котла приведены на (рис. 3.15– рис.3.16).

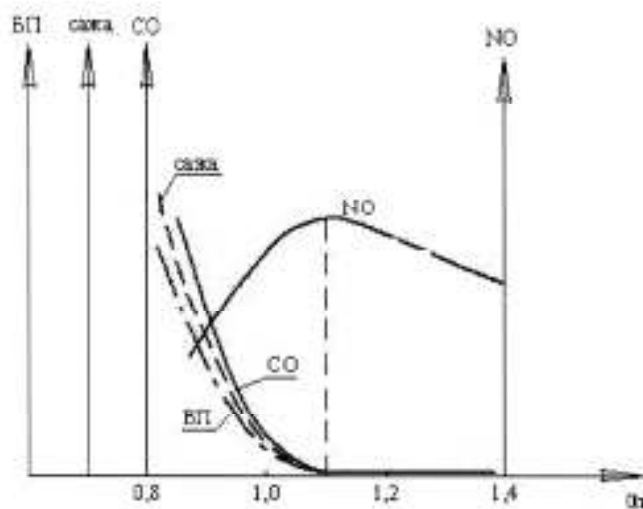


Рис. 3.15. Зависимость образования вредных веществ от коэффициента избытка воздуха в топке α_T

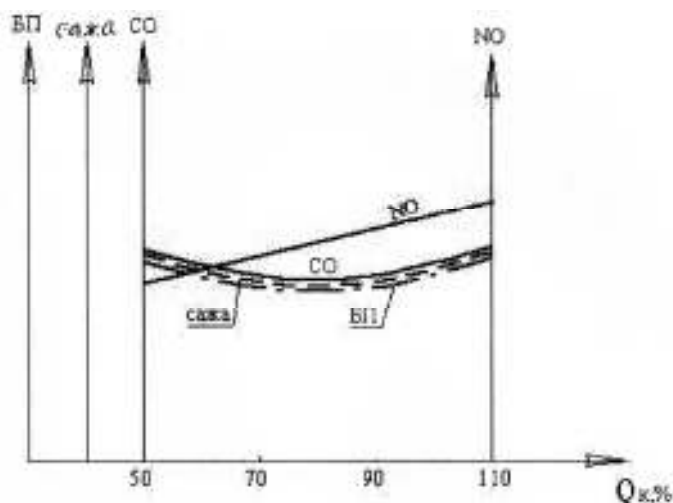


Рис. 3.16. Зависимость образования вредных веществ от тепловой нагрузки котла Q_k

Технологические методы снижения выброса оксидов азота методом подавления их образования в топочной камере

Методы подавления оксидов азота в топочной камере основаны на создании процессов горения с минимальным образованием NO. Эти методы базируются на механизме образования оксидов азота [24]. Анализ условий образования NO показывает, что для образования оксидов азота необходимы высокие температуры в топочной камере, локальные высокотемпературные участки в зоне факела, избыток кислорода в зоне синтеза NO и высокое тепловое напряжение топочного объёма.

В настоящее время энергетиками в России и за рубежом разработано и внедрено в промышленность большое количество технических решений, обеспечивающих снижение образования оксидов азота [24, 25, 37 и др.].

На рис. 3.17 представлена упрощенная схема, которая охватывает практически все проверенные в промышленности технологические мероприятия по снижению образования оксидов азота (ВТИ, ЦКТИ, МЭИ, Институт Газа Украины).

Технологические методы снижения выбросов оксидов азота



Рис. 3.17. Технологические методы снижения оксидов азота

Изучение отечественного и зарубежного опыта показывает, что технологические методы снижения выбросов оксидов азота основаны на сжигании топлива в условиях минимального образования NO_x .

Наиболее полно апробированы эти методы применительно к крупным энергетическим объектам – ТЭЦ.

Особенность этих объектов в том, что энергетические установки отличаются более совершенным оборудованием, полной автоматизацией процесса горения и выброс продуктов неполного сгорания в них на современном уровне может быть исключен.

Результаты многолетнего опыта внедрения технологических методов снижения NO_x в энергетических котлах сведены в табл. 3.3. Анализ таблицы

показывает, что на конкретных энергетических объектах достигнута высокая степень снижения NO_x (50- 70)%. Остаточная концентрация NO_x в продуктах сгорания доведена до (70–125) мг/м^3 , в то время как до мероприятий концентрация NO_x составляла от (250-1500) мг/м^3 .

Таблица 3.3

Результаты испытаний котлов

Методы подавления оксидов азота	Производимость котла	Топливо	Содержание NO_x в мг/м^3 при $\alpha = 1,4$		Место внедрения, испытаний
			до внедрения	после внедрения	
Паровые котлы					
Двухступенчатое сжигание топлива	420 т/ч	газ мазут	250 425	140 240	ТЭЦ–9 Мосэнерго ТГМ-84
Трехступенчатое сжигание топлива	480 т/ч	газ мазут	470 370	230 220	ТЭЦ–8 Мосэнерго ТГМ–96Б
Ввод рециркуляции дымовых газов на всас дутьевых вентиляторов	420 т/ч	газ	300	125	Новорязанская ТЭЦ, ТГМ–84
Рециркуляция дымовых газов ($\tau = 25\%$), ступенчатое сжигание	950 т/ч	газ мазут	1500 1320	100 210	ТЭЦ–26 Мосэнерго ТГМП–344
Водогрейные котлы					
Горелки с пониженным выходом NO_x типа ГДС и двухступенчатое сжигание	100 Гкал/ч	газ мазут	220 350	120 260	Каунасская ТЭЦ ПТВМ–100
Двухступенчатое сжигание топлива	100 Гкал/ч	газ	220	60	Курская ТЭЦ №1 КВГМ–100
Подача газов рециркуляции в воздухопровод перед горелками	180 Гкал/ч	газ мазут	220 400	50 150	ТЭЦ–21, ТЭЦ–23, ТЭЦ–25 Мосэнерго КВГМ–180

На основе опытных данных остаточная концентрация $\text{NO}_x=125 \text{ мг/м}^3$ в сухих продуктах сгорания при $\alpha=1,4$ заложена в нормативный документ ГОСТ Р50831–95 «Установки котельные. Тепломеханическое оборудование. Общие технические требования при работе котлов на газообразном топливе».

Использование технологических методов снижения токсичных выбросов в *промышленных и отопительных котельных* имеет свои особенности. Количество промышленных котлов многообразно, культура эксплуатации чрезвычайно низка. Выброс токсичных веществ на единицу сжигаемого

топлива значительно выше. Особенно это относится к продуктам незавершенного горения: СО, саже, бенз(а)пирену, реальное содержание которых в условиях эксплуатации резко отличается от полученных при наладке. Автоматика процессов горения и приборы для определения концентраций СО и NO_x практически отсутствуют.

Технологические методы снижения NO_x крайне медленно внедряются в промышленных котлах. Опыт экспериментальных исследований показал, что на промышленных и отопительных котлах можно добиться снижения NO_x на 20–30% сочетанием ряда способов (например, ступенчатое сжигание, рециркуляция продуктов сгорания) при отсутствии СО, сажи, бенз(а)пирена. Дальнейшего снижения выброса NO_x на этих котлах можно добиться лишь при реконструкции котлов путем установки специального дожигательного устройства (см. раздел 3.2.2.).

Классификация методов подавления образования оксидов азота:

- ступенчатая подача окислителя в топочную камеру котла;
- ввод воды или пара в топочную камеру;
- рециркуляция продуктов сгорания в топочную камеру котла;
- специальные горелочные устройства с минимальным образованием оксидов азота.

Использование ступенчатого сжигания топлива.

Энергетические котлы отличаются от промышленных многоярусным расположением горелочных устройств. Это дает возможность осуществить ступенчатую подачу окислителя по высоте топочной камеры. Метод заключается в следующем. В нижний ярус горелочных устройств воздух подается в количестве меньшем, чем теоретически необходимое для горения ($\alpha_1=0,8$). В остальные ярусы горелок воздух подается с избытком таким образом, чтобы суммарный избыток воздуха в топке на выходе из топки α_m был равен нормативному значению (рис. 3.18).

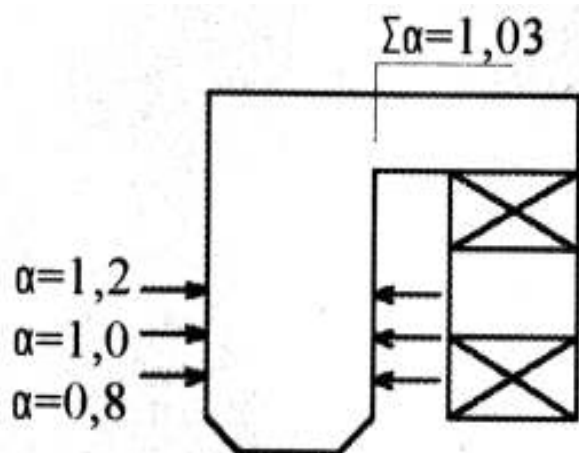


Рис. 3.18. Ступенчатое сжигание топлива в энергетических котлах

Образование оксидов азота снижается по следующим причинам:

- в нижней части топочной камеры *понижена температура* (см. рис. 1.3) в результате неполного сгорания топлива с частичной его газификацией ввиду *недостатка окислителя* (см. рис. 1.4);
- теплоотвод в нижней части топки снижает температуру газов, поэтому заключительная стадия процесса горения происходит также при более низкой температуре;
- верхняя зона горения забалластирована продуктами сгорания из нижней части топочной камеры.

Промышленные котлы не имеют многоярусного расположения горелочных устройств. Они, как правило, оснащены одной или двумя горелками, размещенными в одной плоскости. Поэтому ступенчатая подача окислителя в таких котлах осуществляется не по высоте, а по длине топочной камеры (см. рис. 3.19).

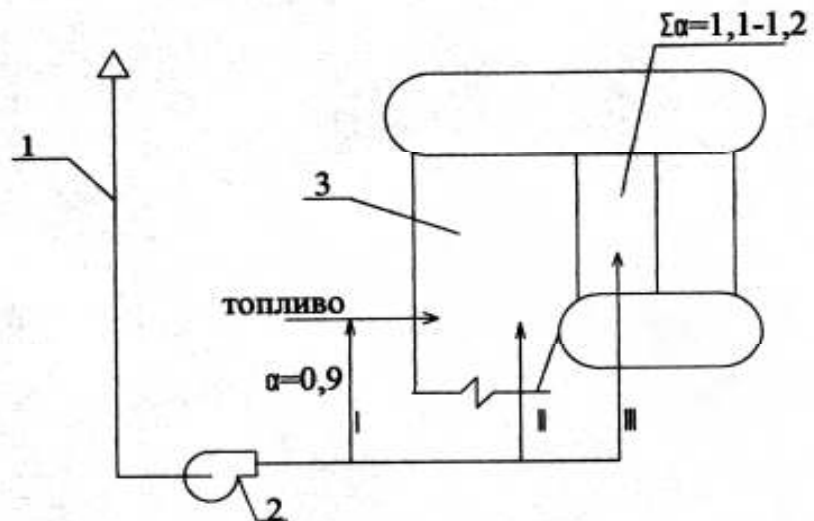
В горелки воздух подается в недостаточном количестве $\alpha=(0,9 - 0,95)$. Меньшее количество воздуха в горелку подавать нецелесообразно, особенно при малой длине топочной камеры во избежание химической неполноты сгорания. Поэтому и степень снижения оксидов азота не превышает, как правило, (25-30)%. Остальное количество воздуха подводится непосредственно в топочную камеру, минуя горелочное устройство. В целом избыток воздуха на выходе из топочной камеры должен быть равен нормативному для данного типа котлов ($\alpha_T = 1,1$).

Образование оксидов азота снижается по следующим причинам:

- в передней части топочной камеры в результате *недостатка* окислителя происходит неполное горение топлива с частичной его газификацией, что приводит к снижению температуры – синтез NO замедляется;
- среднетопочная температура газов снижается, поэтому заключительная стадия процесса горения происходит также при более низкой температуре;
- зона догорания в хвостовой части топки забалластивается продуктами сгорания и синтез NO сильно затруднен.

Рис. 3.19. Ступенчатая подача окислителя в промышленных котлах:

1 - воздухозаборная шахта; 2 – дутьевой вентилятор; 3 – топочная камера



Ввод воды и пара в топочную камеру

Ввод воды или пара в топочную камеру приводит к снижению локальных высокотемпературных участков факела и среднетопочной температуры в результате затрат теплоты на испарение воды и перегрев пара. Подача воды или пара осуществляется непосредственно в горелочное устройство.

При подаче небольшого количества воды или пара процесс сгорания даже улучшается, так как молекулы H_2O под влиянием высоких температур диссоциируют на атомы водорода H и гидроксильного радикала OH.

Гидроксильный радикал OH интенсифицирует реакции горения, в том числе дожигание CO. Однако при увеличении расхода вводимых в топку пара или воды снижение температуры в топке превалирует, что ведет к образованию продуктов неполного сгорания.

Кроме того, введение воды или пара в топочную камеру повышает парциальное давление водяного пара в продуктах сгорания и, как следствие, температуру точки росы продуктов сгорания. Таким образом, возникает опасность конденсации водяных паров из продуктов сгорания в низкотемпературных поверхностях нагрева котла и особенно в дымовой трубе. Следовательно, расход воды или пара, подаваемых в топочную камеру (как правило, с дутьевым воздухом), должны быть строго регламентированы.

Испытания, проведенные на внедренных установках показывают, что расход воды или пара не должен превышать 10% от расхода дутьевого воздуха. Исходя из этих условий, допустимое (с точки зрения эффективной работы котла) снижение оксидов азота не превышает (10-15)%.

Рециркуляция продуктов сгорания в топку котла

Метод заключается в возврате части продуктов сгорания из газового тракта котлоагрегата в топочную камеру (рис. 3.20).

Причины пониженного образования оксидов азота:

- снижение максимальной температуры горения в результате разбавления охлажденными продуктами сгорания;
- балластировка зоны образования NO продуктами сгорания, т.е. снижение концентрации реагирующих веществ;
- растягивание зоны горения, т.е. снижение температуры факела в результате большей теплоотдачи от его поверхности.

При использовании метода рециркуляции в энергетических котлах были исследованы [24, 25] несколько способов ввода газов в топочную камеру: через щлицы под горелками, через кольцевой канал вокруг горелок и подмешивание газов в дутьевой воздух перед горелками.

Наиболее эффективным оказался последний способ, при котором в наибольшей степени происходит снижение температуры в ядре факела, а степень снижения образования NO – (50-70)%.

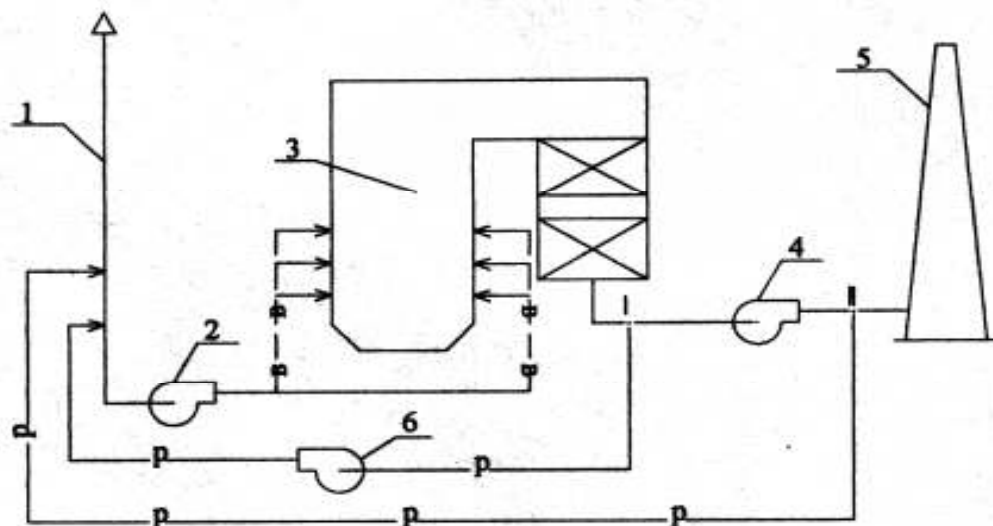


Рис. 3.20. Рециркуляция продуктов сгорания в энергетических котлах: 1 - воздухозаборная шахта; 2 – дутьевой вентилятор; 3 – топочная камера; 4 – дымосос; 5 – дымовая труба; 6 – дымосос рециркуляции; р – линия рециркуляции продуктов сгорания

Оптимальное количество рециркулируемых газов в энергетических котлах 20% от расхода продуктов сгорания. Принципиально возможны 2 схемы отбора рециркулируемых газов (см. рис. 3.20):

– точка I - из газохода под разрежением, т.е. из всасывающей линии дымососа; при этом необходим специально устанавливаемый рециркуляционный дымосос;

– точка II - из газохода под давлением, т.е. из напорной части дымососа.

Преимущество первой схемы в том, что отбор газов на рециркуляцию при помощи специального *рециркуляционного* дымососа позволяет регулировать расход отбираемых газов. Недостаток – затраты на установку и эксплуатацию дымососа.

Преимущество второй схемы в том, что отпадает необходимость в установке специального дымососа (газы поступают в топочную камеру за счет остаточного напора основного дымососа). Недостаток этой схемы – запаса в напоре основного дымососа, как правило, недостаточно для отбора оптимального расхода газов. В этом случае степень снижения оксидов азота уменьшается до (40-30)% и менее.

В **промышленных** котлах используется преимущественно *вторая* схема, (см. рис. 3.21, точка II), т.е. отбор газов на рециркуляцию осуществляется из

напорной части газового тракта. При этом дымосос и вентилятор устанавливаются в непосредственной близости друг от друга с целью снижения аэродинамического сопротивления газохода рециркуляции.

Это позволяет осуществить отбор оптимального расхода возвращаемых в топку продуктов сгорания и способствует снижению уровня образования оксидов азота в промышленных котлах до 50% при условии установки специальных дожигательных устройств (подробно см. раздел 3.2.2).

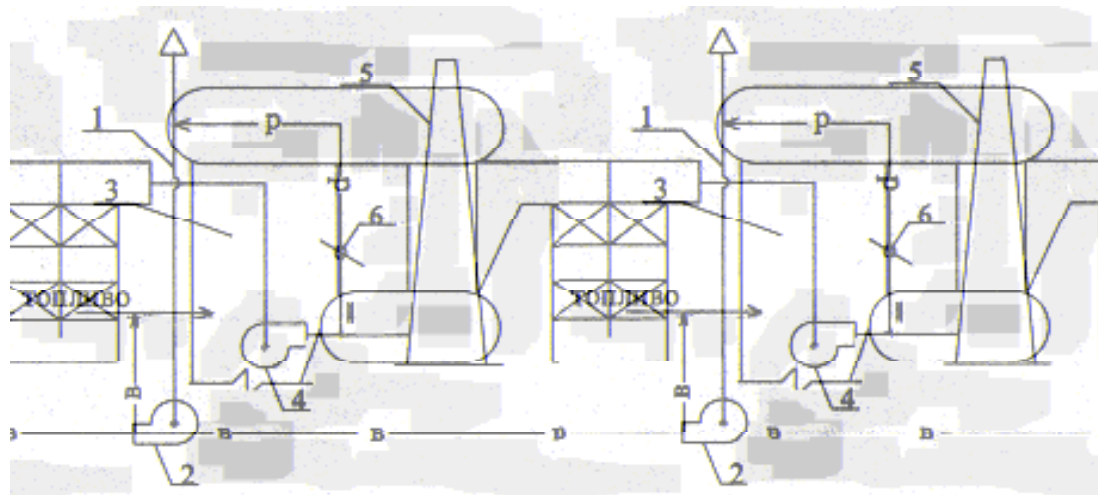


Рис. 3.21. Рециркуляция продуктов сгорания в промышленных котлах: 1 – воздухозаборная шахта; 2 – дутьевой вентилятор; 3 – топочная камера; 4 – дымосос; 5 – дымовая труба; 6 – шибер; в – воздух; р – газы рециркуляции

Применение специальных газогорелочных устройств с пониженным образованием оксидов азота

Конструкция газогорелочных устройств также оказывает влияние на выход оксидов азота за счет изменения геометрических размеров факела, максимальной температуры пламени, времени пребывания газов в зоне высоких температур и других факторов.

Топливосжигающие устройства, разработанные ранее без учета экологических характеристик, отличаются, как правило, повышенным выходом оксидов азота. Это обусловлено тем, что газогорелочные устройства разрабатывались с позиции обеспечения максимальной полноты сгорания топлива. Они конструировались таким образом, чтобы факел был компактным, ядро факела концентрировалось вблизи устья горелочного устройства. Таким образом достигались максимально возможные температуры в факеле и полнота сгорания топлива осуществлялась при минимальном избытке воздуха.

Анализ механизма *синтеза оксидов азота* показывает, что именно эти условия (высокие температуры, локализация факела, минимальный избыток

воздуха) способствуют их максимальному образованию [24]. В конечном итоге такое сжигание топлива и привело к высоким фоновым концентрациям оксидов азота в крупных промышленных центрах.

При разработке новых горелочных устройств используются те же методы подавления образования *оксидов азота*, которые были изложены выше: рециркуляция продуктов сгорания, ступенчатое сжигание, снижение коэффициента избытка воздуха.

Рассмотрим особенности конструктивного решения горелок с пониженным образованием оксидов азота:

- горелки со *ступенчатой подачей воздуха* для получения растянутого факела (см. рис. 3.22); в этой горелке за счет ступенчатой подачи окислителя увеличивается длина факела, возрастает его поверхность и, как следствие, теплоотдача от факела, что приводит к снижению его температуры, затрудняет образование оксидов азота.

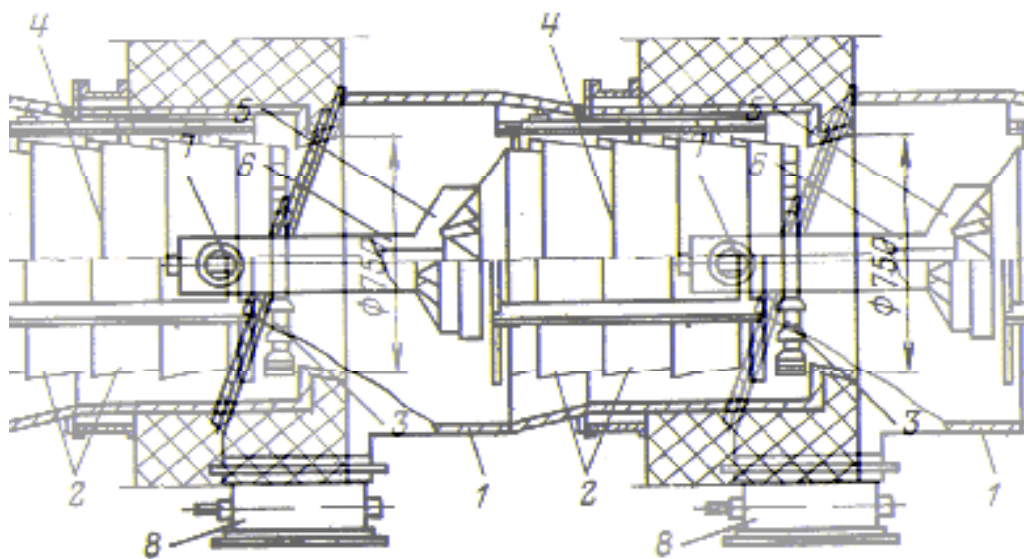


Рис. 3.22. Горелка со ступенчатой подачей воздуха.

- микрофакельные горелки; наличие множества малых факелов способствует их быстрому охлаждению и, как следствие, пониженному образованию оксидов азота;

- горелки с рециркуляцией продуктов сгорания к устью факела. Конструкция горелки выполнена так, что факел растягивается в ширину за счет рециркуляции части продуктов сгорания к устью факела. Выход оксидов азота

снижается за счет баллаستировки зоны горения рециркулирующими газами и снижения максимальной температуры факела.

Возможность режимных технологических способов подавления образования NO_x ограничена условиями поддержания теплового КПД установок и режима эксплуатации агрегата, а в некоторых случаях и недостаточной степенью снижения содержания оксидов азота в уходящих газах. Для получения высокой степени очистки технологические методы целесообразно применять в комплексных схемах в сочетании с экозащитным оборудованием.

Технологические методы снижения выброса сернистых соединений

Крупным источником загрязнения воздушного бассейна являются продукты сгорания органического топлива, содержащего серу в рабочей массе топлива. Суммарный выброс сернистых соединений (SO_2 , SO_3 и H_2SO_4) с продуктами сгорания определяется содержанием серы в рабочей массе топлива и, следовательно, не может быть снижен изменением режимов горения.

К *технологическим* методам снижения выбросов SO_2 , SO_3 и H_2SO_4 можно отнести способы снижения содержания серы в топливе, либо сжигание серо-содержащего топлива в топочной камере в условиях связывания сернистых соединений.

Классификация существующих технологических методов:

1. Твёрдое топливо: обогащение твердого топлива; гидротермическое обессеривание; газификация; сжигание с подачей в слой известняка.
2. Жидкое топливо: очистка от серы на нефтеперерабатывающих заводах; газификация мазута перед сжиганием на ТЭЦ; связывание в топочной камере специальными добавками; сжигание в слое известняка.

Удаление серы из твердого топлива

Сера в твердом топливе содержится в 3^{-х} формах: колчеданной (в виде железного колчедана (FeS), органической (в виде сероорганических соединений) и сульфатной (сернокислые соли – сульфаты Ca SO_4 , Na_2SO_4).

Простейшее обогащение угля – удаление колчеданной серы *сепарацией*.

В этом методе используется разница в плотности угля и колчеданной серы ($\rho_{\text{FeS}}=5 \text{ т/м}^3$, $\rho_{\text{угля}}=2 \text{ т/м}^3$). Этим способом удаляется свыше 30% серы.

Для отделения колчеданной и органической серы используется *метод гидротермического обессеривания*. В этом случае измельченное топливо обрабатывается в автоклавах при температуре 300°C и давлении 1,7 МПа щелочными растворами KOH, NaOH.

Снижение серы в твердом топливе можно осуществить *методом газификации или пиролиза* твёрдого топлива [38]. Основное количество серы окажется связанным в коксовом остатке.

Следующий метод снижения выброса сернистых соединений - это *сжигание твёрдого топлива с подачей в слой известняка*. При загрузке твёрдого топлива вместе с топливом подается дозированное количество известняка.

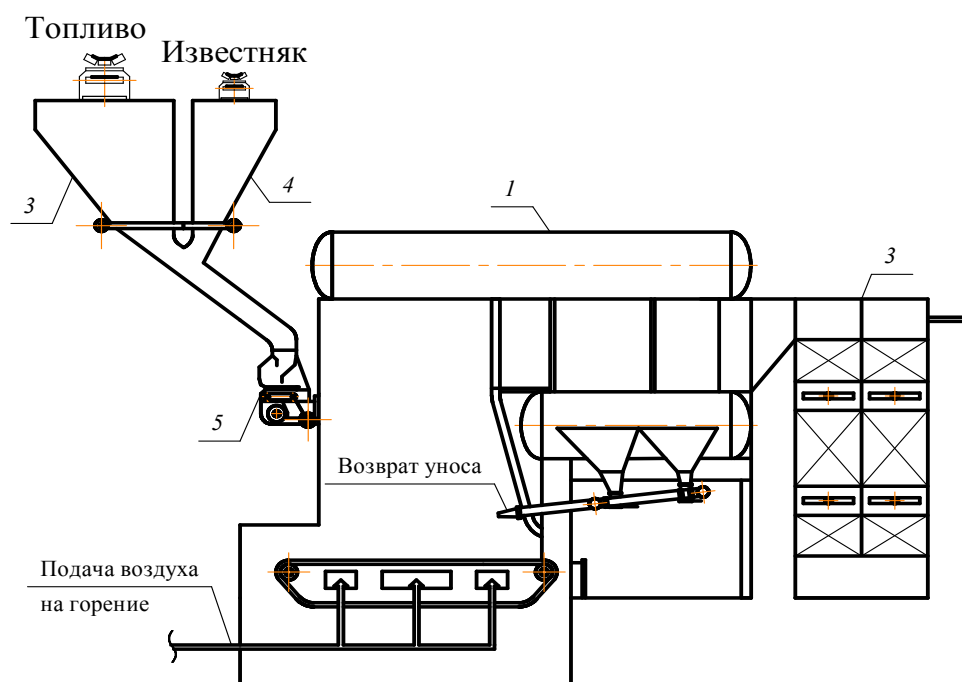


Рис. 3.23. Подача известняка в слой твёрдого топлива:
1 – котёл; 2 – экономайзер; 3 – бункер топлива; 4 – бункер известняка; 5 – пневмомеханический забрасыватель твердого топлива

Для более эффективного связывания сернистых соединений твёрдое топливо лучше сжигать в кипящем слое частиц размолотого известняка, в которые погружены поверхности нагрева котла с целью интенсивного охлаждения слоя.

При температуре около 900°C происходит диссоциация CaCO₃:



Оксид кальция вступает в реакцию с серой, образуя в окислительной зоне CaSO₄ – сульфат кальция, а в восстановительной – сульфид кальция.



Очистка топлива от серы при этом может составлять около 90%.

Наряду с определенными преимуществами этот способ имеет существенные недостатки, связанные с дополнительной организацией установок для приготовления фракций известняка, созданием установок по регенерации сернистых соединений кальция и улавливанием твёрдых частиц.

Удаление серы на нефтеперерабатывающих заводах

Сера содержится в нефти, в основном, в виде сложных *полигетероциклических соединений*. Эти соединения химически малоактивны и обладают высокой термостабильностью, в связи с чем их трудно разрушить воздействием кислот или щелочей.

Поэтому для выделения серы из топлива до сжигания, это топливо либо подвергается воздействию высоких температур, либо этот процесс сочетается с воздействием химических веществ.

Удаление серы из нефтяных топлив можно осуществить *гидроочисткой, газификацией и пиролизом*. Эти процессы подробно описаны в [37].

Сжигание мазута в кипящем слое известняка

Способ сжигания топлива *в кипящем слое известняка* с целью связывания сернистых соединений уже был рассмотрен применительно к твёрдому топливу. Аналогичные реакции будут проходить и при сжигании мазута, подаваемого мазутной форсункой в слой известняка.

На рис. 3.24 условно представлен циркуляционный контур котла, погружённый в слой известняка. Мазут подаётся в верхнюю зону топочной камеры, а воздух под распределительную решётку. Горение происходит

в кипящем слое известняка, что позволяет улучшить контакт известняка с топливом и, как следствие, улучшить процесс связывания сернистых соединений. Часть слоя известняка периодически подаётся на регенерацию.

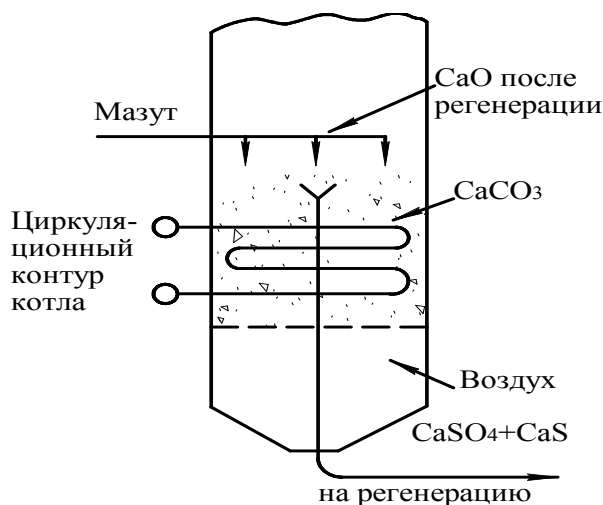


Рис. 3.24. Схема сжигания мазута в кипящем слое CaCO_3

3.2. Методы очистки выбросов энергетических установок от вредных веществ

Для очистки выбросов энергетических установок, в том числе котельных, используются следующие методы *очистки продуктов сгорания*:

- восстановительные методы – для снижения оксидов азота восстановлением оксидов азота до азота N_2 газами–восстановителями в присутствии катализаторов или без них;
- методы термического обезвреживания – для очистки продуктов сгорания от горючих токсичных компонентов продуктов неполного сгорания (CO , сажи, бенз(а)пирена;
- сорбционные методы – для очистки продуктов сгорания от оксидов серы и азота адсорбцией, абсорбцией или хемосорбцией;
- методы механической очистки продуктов сгорания от зольных частиц (сухие и мокрые);
- радиационно-химические методы очистки дымовых газов от оксидов азота и серы.

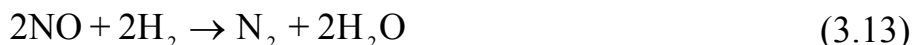
Ниже подробно рассмотрены существующие и перспективные методы очистки выбросов котлов от вредных веществ.

3.2.1. Восстановительные методы очистки выбросов энергетических и промышленных котлов от оксидов азота

В последние годы широко применяются *восстановительные* методы применительно к очистке от оксидов азота. *Восстановительные методы* основаны на реакции восстановления оксидов азота до азота специальными веществами, называемыми *восстановителями*. В качестве восстановителей используются водород, оксид углерода, метан и другие углеводороды, аммиак,

аммиачная вода, раствор карбамида и др. По способу воздействия восстановители разделяются: на *селективные*, действующие избирательно (аммиак, аммиачная вода, раствор карбамида), и *неселективные* - водород, оксид углерода, метан и другие углеводороды.

Методы восстановления оксида азота природным газом, водородом или оксидом углерода основаны на реакциях:



Недостаток данных восстановителей заключается в том, что все они способны вступать в реакцию с оксидом азота лишь при отсутствии кислорода в продуктах сгорания. Поэтому наиболее эффективными признаны *селективные* восстановители на основе аммиака и его соединений:



В настоящее время в промышленно развитых странах разработаны в основном две схемы:

- гомогенное некаталитическое восстановление оксида азота аммиаком;
- селективное каталитическое восстановление с использованием аммиака или его соединений.

Менее затратным является гомогенное некаталитическое восстановление оксидов азота аммиаком ввиду отсутствия затрат на покупку и эксплуатацию катализаторов.

Высокотемпературное гомогенное восстановление оксидов азота

В большинстве случаев в качестве газа-восстановителя в этом процессе используется аммиак, который действует селективно (избирательно). Поэтому этот процесс еще называют селективным некаталитическим восстановлением (процесс СНКВ). Процесс восстановления протекает при температуре (930-950)°С, причем присутствие кислорода дает заметный положительный эффект. Схема восстановления оксидов азота аммиаком представлена на рис.3.25.

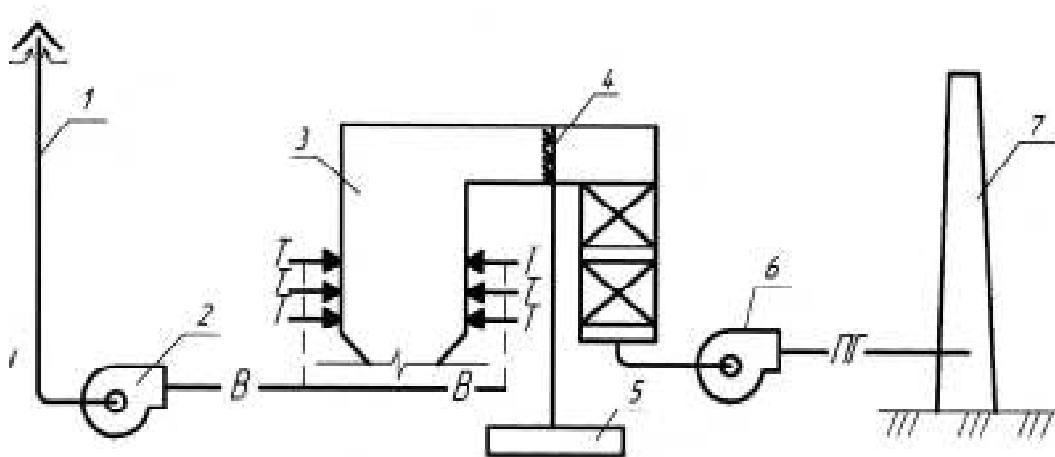


Рис. 3.25. Схема высокотемпературного гомогенного восстановления оксидов азота: 1 – воздухозаборная шахта; 2 – дутьевой вентилятор; 3 – топочная камера; 4 – ввод аммиака; 5 – установка приготовления аммиака; 6 - дымосос; 7 – дымовая труба; - В- воздух; -Т- топливо; - ПГ- продукты сгорания

Аммиак или его соединения вводятся в газоход на выходе из топочной камеры. Установка приготовления аммиака представлена на рис. 3.26.

Требуемая неравномерность распределения аммиака по сечению газохода достигается выбором шага между отверстиями по длине раздающих труб и размеров отверстий в трубах. Эффективность очистки от оксидов азота в энергетических котлах достигает 71–72 % и более.

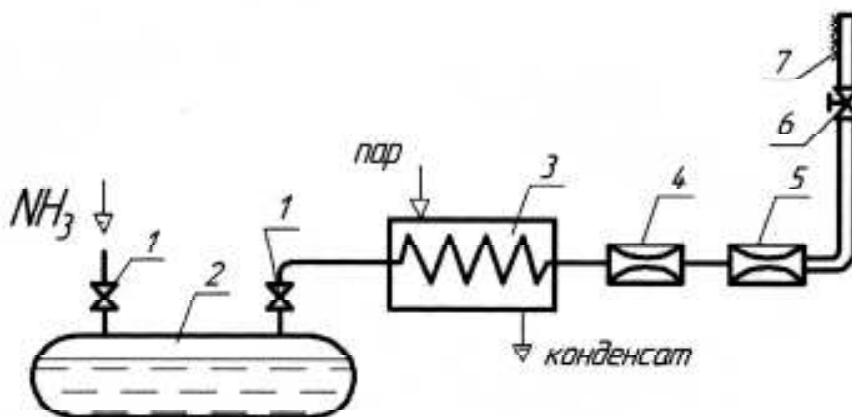


Рис. 3.26. Схема установки приготовления аммиака: 1 – задвижка; 2 – бак с аммиаком; 3 – испаритель аммиака; 4 – дозатор аммиака; 5 – редуктор; 6 – вентиль; 7 - форсунка

Преимущества метода: достаточно высокая степень от оксидов азота; простота аппаратного выполнения.

Недостатки метода: трудность обеспечения постоянной температуры в месте, где аммиак вводится в дымовые газы при изменении нагрузки котла;

узкий температурный интервал (930-950)°С в зоне ввода аммиака; аммиак является токсичным, пожароопасным и взрывоопасным веществом; остаток аммиака проходит с дымовыми газами далее по тракту и выбрасывается из дымовой трубы в атмосферу

Температурный интервал обусловлен следующими обстоятельствами: при понижении температуры дымовых газов аммиак взаимодействует с соединениями серы и водяным паром с образованием бисульфата аммония NH_4HSO_4 , который откладывается на низкотемпературных поверхностях нагрева котла.

Каталитическое восстановление оксидов азота

Катализ – наиболее эффективное и рациональное средство ускорения химических реакций, а, следовательно, понижения необходимой температуры процесса. В качестве восстановителей используются селективно действующие аммиак и его соединения.

В нашей стране метод каталитического восстановления оксидов азота был впервые внедрен Донецким филиалом ВНИПИ Черметэнергоочистка в металлургической промышленности для очистки дымовых газов за котлом производительностью 20 т/ч, в котором сжигался коксовый газ [24]. Схема установки приведена на рис. 3.27.

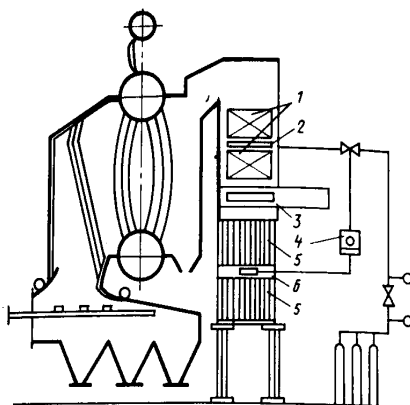


Рис. 3.27. Каталитическая очистка дымовых газов от NO_x :
1 – экономайзер; 2 – распределитель аммиака; 3 – аппарат каталитической очистки; 4 – вторичный прибор; 5 – воздухоподогреватель; 6 – датчик концентрации оксидов азота.

Эффективность очистки дымовых газов от NO_x достигала 95%, если концентрация оксидов азота на входе не превышала $1,0 \text{ г/м}^3$, запыленность – $0,1 \text{ г/м}^3$, а температура газов составляла (280–320)°С. Снижение температуры очищаемых газов до 250°С уменьшало эффективность очистки от NO_x до 85%.

В последние годы наиболее эффективной признана технология селективной каталитической очистки продуктов сгорания от оксидов азота

ДЕНОКС [40] датской фирмы Хальдор Топсе (рис. 3.28). В качестве восстановителя могут быть использованы аммиак или аммиачная вода.

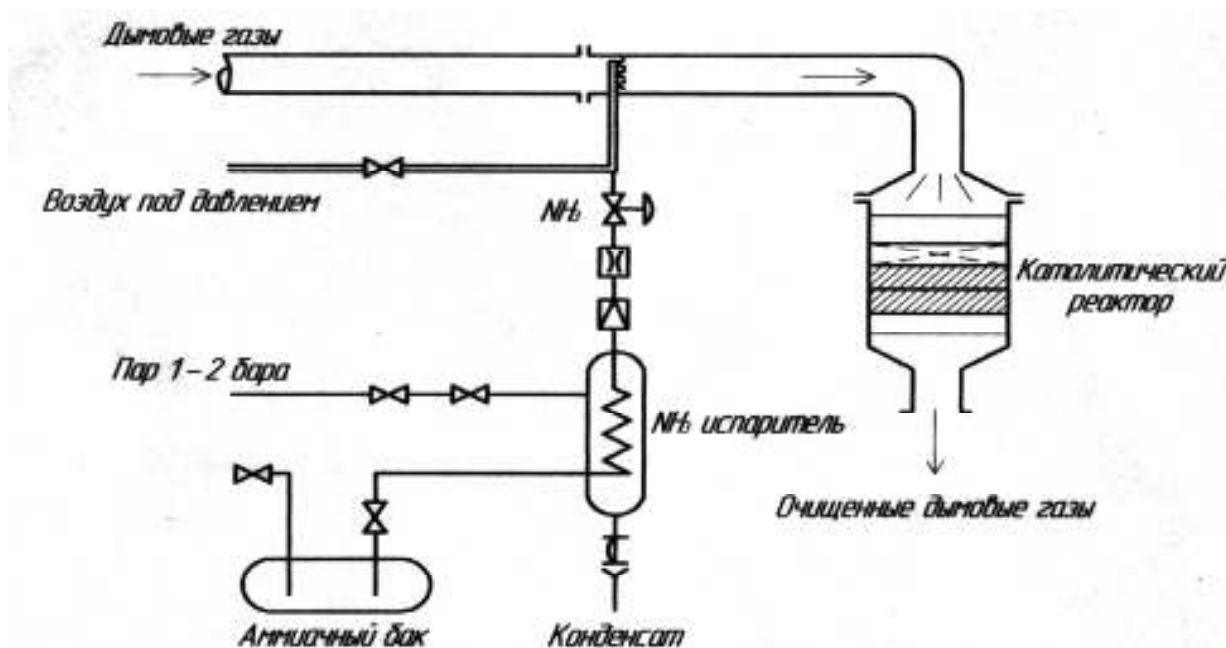


Рис. 3.28. Технология каталитической очистки дымовых газов фирмы «Топсе»

Катализатор ДЕНОКС (DENOX) имеет монолитную структуру, т.е. состоит из блоков катализатора с большим количеством параллельных каналов, стенки которых каталитически активны. Таким образом, вероятность засорения катализатора пылью сведена к минимуму, а перепад давления на катализаторе поддерживается на низком уровне.

Катализатор изготавливается в стандартных кассетах двух типов размером 466×466×570 мм и 466×466×332 мм соответственно на основе TiO_2 . Для более легкого монтажа кассеты предварительно собираются в укрупненные модули. Температура нормальной эксплуатации катализатора DENOX=(300–450)°C.

Эта очистка введена в эксплуатацию на котле ТГМЕ–464 ТЭЦ–27 АО «Мосэнерго» в июне 1997 г., а в 2008 г. установлена на Дзержинской ТЭЦ Нижегородской области. В качестве восстановителя оксидов азота используются аммиак или аммиачная вода. Испытания показали высокую надёжность системы и высокую эффективность, позволяющую обеспечить концентрации оксидов азота на выходе 25 мг/м³. Степень очистки дымовых газов от оксидов азота составила более 90%.

Для снижения стоимости установки предлагается вместо импортных

DENOX использовать отечественные: реактор НИИОГАЗ и катализаторы АОК–78–55 и АОК–78–55КМ, которые были специально разработаны Новосибирским предприятием ОАО «Катализатор» для селективного каталитического восстановления.

3.2.2. Термическое обезвреживание оксида углерода, сажи, бенз(а)пирена в выбросах промышленных котлов

Оксида углерода, сажи и бенз(а)пирен являются продуктами химической неполноты сгорания различных видов топлива (см. раздел 1.2). Следовательно, для их устранения необходимо обеспечить в топочной камере условия для полного сгорания топлива. Для поддержания оптимальных параметров работы котлов в процессе их эксплуатации проводятся периодически режимно-наладочные испытания (сведения о режимно-наладочных испытаниях котлов приведены в разделе 3.1.4).

Однако в последние годы появился ряд методов снижения оксидов азота, последствием которых является снижение теплотехнических показателей котлов, в том числе появление неполноты сгорания. Обеспечить полноту сгорания топлива при использовании методов подавления оксидов азота позволит специальная установка дожигательных устройств на выходе из топочной камеры.

Использование дожигательных устройств

Кафедрой Теплогазоснабжения ННГАСУ с 1972 г. проводятся исследования метода дожигания горючих токсичных веществ, в том числе в производственно–отопительных котельных [41]. Разработан ряд конструкций дожигательных устройств, отличающихся по принципу установки: стационарные дожигательные устройства (ДУ), подвесные ширмовые – ДШУ, кассетно–блочные КДУ.

Простейшее стационарное дожигательное устройство представлено на рис. 3.29 и рис. 3.30. Оно представляет собой два ряда раскалённых огнеупоров с камерой смешения между ними (см. план котла рис. 3.29).

Дожигательное устройство позволяет осуществить контакт раскалённых

поверхностей с топочными газами и обеспечивает высокую степень турбулизации потока продуктов сгорания топлива. За счёт гомогенизации продуктов неполного сгорания с избыточным воздухом в зоне раскалённых огнеупоров происходит интенсивное выгорание монооксида углерода, сажи, бенз(а)пирена.

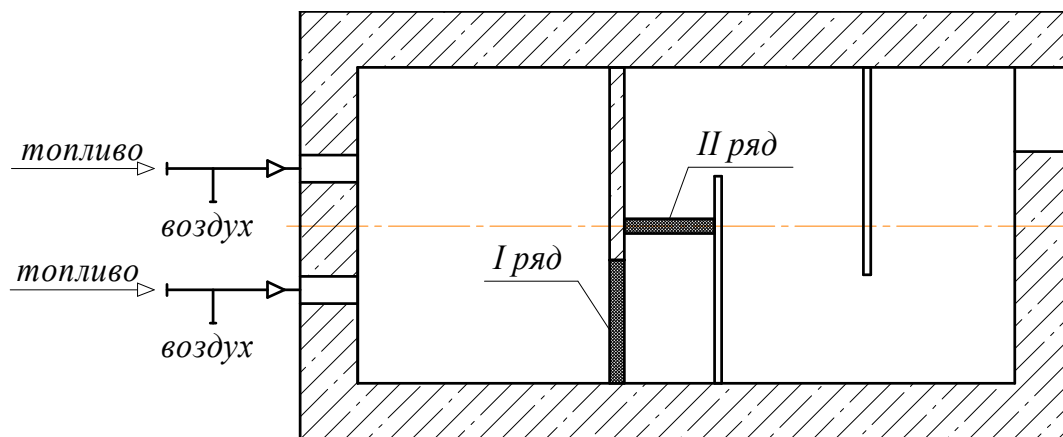


Рис. 3.29 Размещение ДУ в плане котла ДКВр-10-13

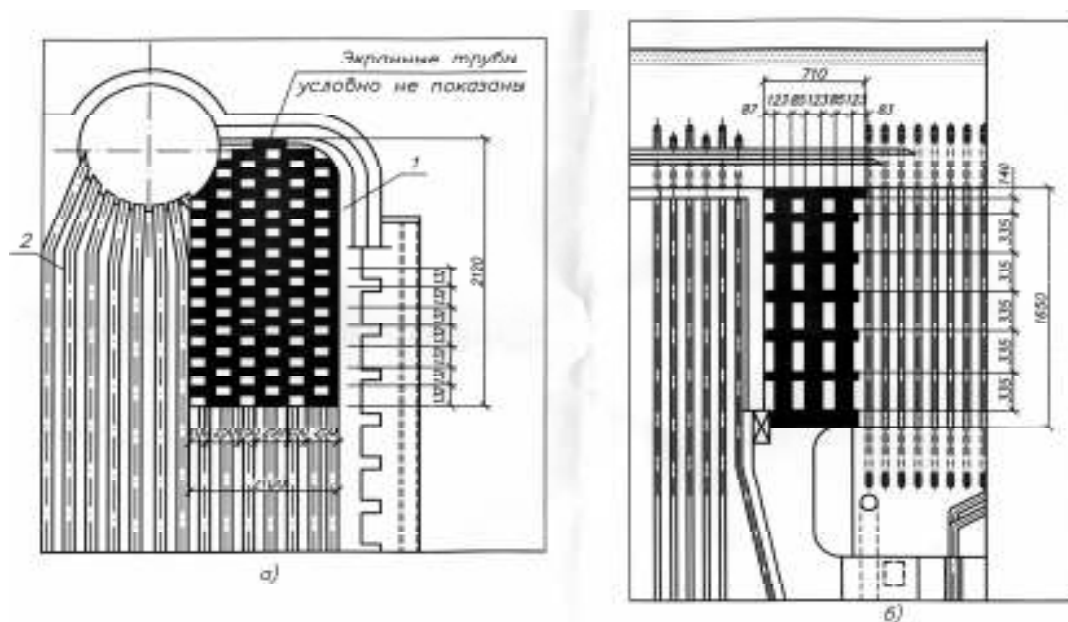


Рис. 3.30. Разрезы котла ДКВр-10-13 с размещением ДУ:

а – 1-ый ряд дожигательного устройства; б – 2-ой ряд дожигательного устройства
1 – кирпичная кладка; 2 – экранные трубы.

Характеристика конструкций ДУ для различных марок котлоагрегатов типа ДКВр представлена в табл. 3.4. Установка ДУ позволяет:

- устранить потери теплоты с химическим недожогом q_3 ввиду полного обезвреживания компонентов (СО, сажи, БП) продуктов неполного сгорания;

- снизить потери теплоты с уходящими продуктами сгорания q_2 ввиду эффективной работы котла с меньшими избытками воздуха в топочной камере;
- снизить плату за загрязнение воздушного бассейна в связи с устранением сажи, оксида углерода, бенз(а)пирена на 99% и более.

Таблица 3.4

Характеристика дожигательных устройств в котлах ДКВР

Наименование	Обозначение	Ед. изм.	ДКВР-4-13			ДКВР-6,5-13			ДКВР-10-13		
			I ряд	II ряд	общ.	I ряд	II ряд	общ.	I ряд	II ряд	общ.
1. Поверхность ДУ, обращенная к потоку	$F_{кл}$	m^2	1,44	0,82	2,26	3,8	2,4	6,2	2,9	1,5	4,4
2. Поверхность каналов	$F_{кан}$	m^2	2,32	2,31	4,63	1,9	0,9	2,8	4,4	3,2	7,6
3. Поверхность ДУобщая	$F_{ду}$	m^2	3,76	3,13	6,89	5,8	3,2	9,0	7,3	4,7	12,0
4. Объем кладки ДУ	$V_{кл}$	m^3	0,18	0,1	0,28	0,24	0,11	0,35	0,18	0,16	0,34
5. Удельная поверхность	$q_{ду}$	m^2/m^3	21	31		24	29		40	19,5	
6. Сечение газохода	$f_{г}$	m^2	1,17	0,6		1,45	0,8		2,2	1,1	
7. Сечение газохода, занятое кладкой	$f_{кл}$	m^2	0,72	0,42		0,94	0,43		1,44	0,73	
8. Живое сечение	$f_{жс}$	m^2	0,45	0,18		0,51	0,36		0,76	0,4	
9. Степень сужения газохода	γ		0,4	0,3		0,35	0,45		0,35	0,36	
10. Объем газов	$V_{г}$	$m^3 \cdot 10^3$	16,5	15,1	15,8	27,7	26,5	27,1	39,0	38,0	38,5
11. Объемная скорость газов	$w_{ф}$	m^3/m^2	4400	4800		2100	3700		3100	3100	
12. Скорость газов в канале	$w_{г}$	м/с	10,2	21,0		19,2	26,8		16,5	26,0	
13. Время пребывания газов в канале	τ	с	0,02	0,01		0,01	0,01		0,01	0,01	
14. Сопротивление ДУ	S	Па	-	-		54,8	68		65	120	

Многолетние испытания стационарных дожигательных устройств на внедренных установках показали:

- при сжигании природного газа и наличии оксида углерода в продуктах сгорания в пределах (0,05–0,2)% оказалось достаточным дожигательное

устройство из двух шамотных решеток с живым сечением (0,4–0,45);

– при сжигании мазута резко увеличивается (на 2 порядка и более) образование сажи и бенз(а)пирена (см. табл. 3.5). Это вызывает необходимость увеличения контактирующей поверхности ДУ и снижение его живого сечения до величины 0,3–0,38;

– при установке дожигательных устройств достигается полнота сжигания топлива (газа и мазута) в широком диапазоне тепловых нагрузок и коэффициентов избытка воздуха (значение концентраций СО, сажи бенз(а)пирена не превышают ПДК в атмосферном воздухе);

– достигнута работа котлов, оснащенных дожигательными устройствами, без химического недожога ($q_3=0$ и снижение q_2) при малых коэффициентах избытка воздуха ($\alpha_t = 1,03–1,05$ при сжигании природного газа и $\alpha_t = 1,05–1,08$ при сжигании мазута). Работа с такими избытками воздуха без ДУ обуславливала потери тепла от химической неполноты сгорания q_3 от 5 до 7%.

Таблица 3.5

Содержание токсичных веществ в продуктах сгорания мазута до и после ДУ

D_k , т/ч	α	Содержание токсичных веществ				Снижение концентрации токсичных веществ, раз	
		до установки ДУ		после установки ДУ			
		СО	БП	СО	БП	СО	БП
12,0	1,25	0,2	-	0,008	-	25	-
12,0	1,2	0,4	20	0,006	0,2	66	100
11,5	1,06	1,55	200	0,01	0,2	155	1000
11,5	1,03	1,8	280	0,08	1,0	23	280
10,5	1,14	0,5	-	0,005	-	100	-
10,0	1,08	0,8	120	0,006	1,0	130	1200
6,0	1,62	0,08	40	0,002	0,1	40	400
6,0	1,08	0,8	100	0,008	0,0	100	500

В результате снижения коэффициента избытка воздуха в топке:

– повысился КПД котлов и КИТ на (1–3)% в зависимости от паропроизводительности котла и режима работы;

– уменьшился расход топлива: природного газа – в среднем на 2%, высокосернистого мазута – на 3%;

– снизился общий объем выбросов на 20–30% (в пересчете на 1 т пара).

Кроме того, установка дожигательных устройств способствовала интенсификации теплопередачи в топке за счёт:

- излучения кладки, размещенной в камере догорания, на топочные экраны и первый ряд конвективного пучка;
- увеличения степени заполнения топки и камеры догорания продуктами сгорания (влияние рециркуляционных зон решеток).

К положительным сторонам системы дожигания относится и более устойчивая циркуляция, особенно в трубках первого ряда конвективного пучка (за счёт излучения кладки). Опрокидывание циркуляции не наблюдалось и в периоды работы котла на пониженных нагрузках.

Следует отметить роль ДУ как аккумуляторов тепловой энергии. При повышенных тепловых нагрузках кладка разогревается, а при переходе к минимальной паропроизводительности отдает теплоту газам, имеющим температуру (700–800)°С, способствуя полноте дожигания токсичных компонентов и повышая КПД котла и КИТ. Аэродинамическое сопротивление двух решеток не превышает (100-200)Па.

Проведенные исследования [41] показали, что при установке ДУ решение задачи защиты воздушного бассейна от канцерогенов и других токсичных веществ сочетается с повышением экономичности котлов, их эффективности и сопровождается экономией топлива. Длительный опыт работы котлов с насадками свидетельствует, что реконструкция не вызывает нарушений работы котла, эксплуатационных затруднений.

Применение дешевого и доступного материала – шамота в температурной зоне 1000°С эффективна и перспективна, так как шамотные огнеупоры работают устойчиво, прочность кладки достаточна. Отложения золы незначительны; оплавления или ошлакования огнеупорных поверхностей дожигательного устройства не наблюдалось.

Для дожигателей, выполненных из других материалов, температура обезвреживания снижается и составляет: для шамотов ША и ШЛА – (780–820)°С, керамзита – (760–780)°С; хромомагнезита – 710 °С.

Каталитическое обезвреживание оксида углерода, сажи, бенз(а)пирена

Каталитическое обезвреживание оксида углерода, сажи, бенз(а)пирена в продуктах сгорания следует применять в том случае, если не удастся установить дожигательное устройство в высокотемпературной зоне.

Для *каталитической* очистки продуктов сгорания от оксида углерода, сажи и бенз(а)пирена применяются *окислительные* катализаторы, а именно оксидные. Это обусловлено тем, что они имеют меньшую стоимость по сравнению с металлическими; не отравляются сернистыми соединениями; не боятся перегрева и не теряют активность при прокачивании кислородсодержащих смесей (так как сами содержат кислород).

Типы и характеристики окислительных катализаторов подробно рассмотрены в разделе 4.2.1. Институтом катализа им. Г.М.Борескова Сибирского отделения Российской Академии Наук (ИК СО РАН) разработан Реверс - процесс для каталитической очистки слабоконцентрированных газовых выбросов от органических веществ и оксида углерода на оксидных катализаторах (рис. 3.31).

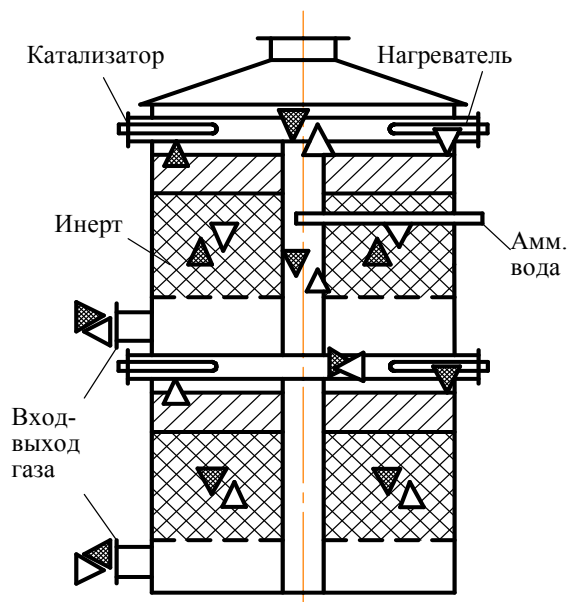


Рис. 3.31 Реактор каталитического окисления ИК СО РАН

РЕВЕРС-ПРОЦЕСС основан на периодическом изменении направления потока очищаемого газа (каждые 5-100 мин.) через неподвижный слой катализатора. На катализаторе происходит превращение токсичных примесей

в безвредные вещества. Выделяющееся в ходе реакции тепло служит для нагрева очищаемого газа, что обеспечивает автотермичность процесса. Периодический реверс газового потока позволяет создать в центре слоя катализатора высокотемпературную зону реакции (300-600 °С), а торцевым слоям инертного материала отводится роль регенераторов тепла.

Более 80 установок на основе РЕВЕРС-ПРОЦЕССА производительностью от 500 до 100 000 м³/ч работают на предприятиях России, стран СНГ, США, Болгарии, Японии, Австралии

3.2.3. Сорбционные методы очистки продуктов сгорания

Сорбционные методы в целом разделяют на адсорбцию и абсорбцию.

Адсорбционный метод основан на физических свойствах некоторых твердых тел с ультрамикроскопической структурой выборочно извлекать отдельные компоненты из газовой смеси и удерживать их на своей поверхности (подробно рассмотрен в разделе 4.2.2, так как преимущественно используется в промышленных установках).

Абсорбционный метод [29] основан на диффузии (молекулярной и турбулентной) газообразных примесей к поверхности раздела газ-жидкость и на их переходе в жидкую фазу.

Как адсорбция, так и десорбция могут быть связаны с прохождением реакции в сорбционном слое, в этом случае следует говорить о *хемосорбции*.

Сорбционные процессы разделяются на необратимые и обратимые, сухие и мокрые. В *необратимых* процессах образуются твердые отходы, которые затем удаляются. Поэтому в таких процессах необходим непрерывный приток новых реагентов. В *обратимых* процессах химическое вещество, которое обеспечивает удаление вредного вещества, непрерывно реагирует в замкнутой системе.

Мокрый и сухой процессы отличаются по признаку: находится ли активное вещество в жидком растворе или нет.

В качестве эффективного оборудования в установках *абсорбционной очистки* используются *насадочные* аппараты, так как в насадках обеспечивается

лучший контакт обрабатываемых газов с абсорбентом, чем в полых распылителях, благодаря чему интенсифицируется процесс массопереноса и уменьшаются габариты очистных устройств. Насадочный аппарат и распространенные типы насадок показаны на рис. 3.32 [29].

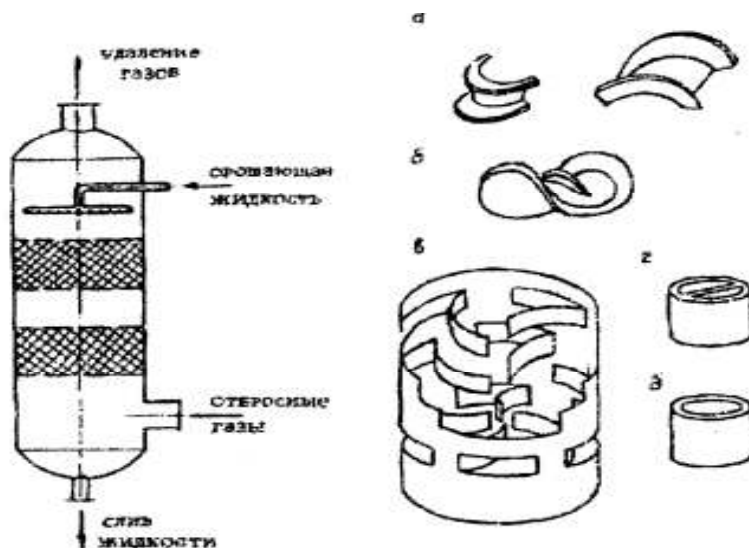


Рис. 3.32. Насадочный абсорбер:
насадки: а – седлообразные "Инталокс", б – седлообразные Берля, в – кольца Палля,
г – кольца Лессига, д – кольца Рашига

Максимальную поверхность контакта на единицу объема образуют седлообразные насадки "Инталокс" (а) и Берля (б). Они имеют и минимальное гидравлическое сопротивление, но стоимость их выше, чем колец. Из кольцевых насадок наилучший контакт создают кольца Палля (в), но они сложны в изготовлении и дороже колец Лессига (г) и Рашига (д).

Начальная равномерность распределения абсорбента достигается посредством ее диспергированной подачи на поверхность насадки через распылительные форсунки или распределительные тарелки с большим числом отверстий. Высоту насадки делят на несколько слоев (ярусов), устанавливая между ними перераспределительные устройства. Для этой цели могут использоваться сетчатые или перфорированные диски (тарелки).

Сорбционные методы очистки продуктов сгорания от оксидов серы

Адсорбционная очистка продуктов сгорания от оксидов серы. Метод сухой очистки дымовых газов от SO_2 (адсорбция) осуществляется

активированным оксидом марганца. Последний получается путем обработки сульфата марганца аммиаком по реакции:



Тонко размолотый оксид марганца подается в дымовые газы, где реагирует с SO_2 с образованием сульфата марганца. Часть выделенного в пылеуловителях абсорбента возвращается на очистку дымовых газов, другая – на регенерацию. Образующийся при регенерации сульфат аммония может использоваться в качестве удобрения. Степень очистки от SO_2 по этому способу составляет около 90%.

Абсорбционные методы очистки выбросов от оксидов серы

Абсорбционные методы очистки выбросов от SO_2 основаны на использовании следующих абсорбентов: известковый (суспензия CaO); содовый (раствор соды Na_2CO_3); аммиачный (водный раствор $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$); магниевый (суспензия MgO); цинковый (суспензия ZnO);

Использование воды в качестве промывающей жидкости не позволяет добиться высокой степени очистки, она зависит от щелочности исходной воды. Чтобы увеличить степень очистки используют окислительно-сорбционные процессы, то есть сначала используют катализ или озонирование, чтобы окислить SO_2 до SO_3 , а затем осуществляют сорбцию водой.

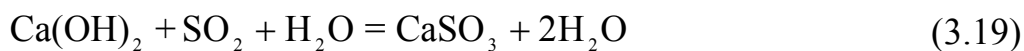
Процессы, связанные с очисткой газов от SO_2 , можно разделить на нециклические и циклические. В нециклических процессах реагент не регенерируется. В циклических процессах наряду с регенерацией реагента получают сернистые соединения (товарный продукт): диоксид серы высокой концентрации, серную кислоту, элементарную серу, сульфат аммония.

Ниже представлены сорбционные схемы очистки, в том числе с получением товарного продукта. В настоящее время они применяются в энергетических котлах, но с повышением фоновых концентраций загрязняющих веществ в атмосферном воздухе будут востребованы и в крупных котельных. Получение товарного продукта приведет к удешевлению метода очистки.

Известковый метод

Известковые методы очистки нашли широкое применение вследствие доступности и дешевизны применяемого сырья.

Метод очистки осуществляется следующим образом. Продукты сгорания промываются щелочным реагентом – раствором гидрата оксида кальция (известью). При этом SO_2 реагирует следующим образом:



Таким образом, в процессе очистки образуются соли кальция – сульфиты и сульфаты. Принципиально возможно получить товарный продукт из сульфатов кальция – гипс, однако это значительно усложняет схему.

Схема приготовления и подачи в скруббер известкового молока представлена на рис. 3.33.

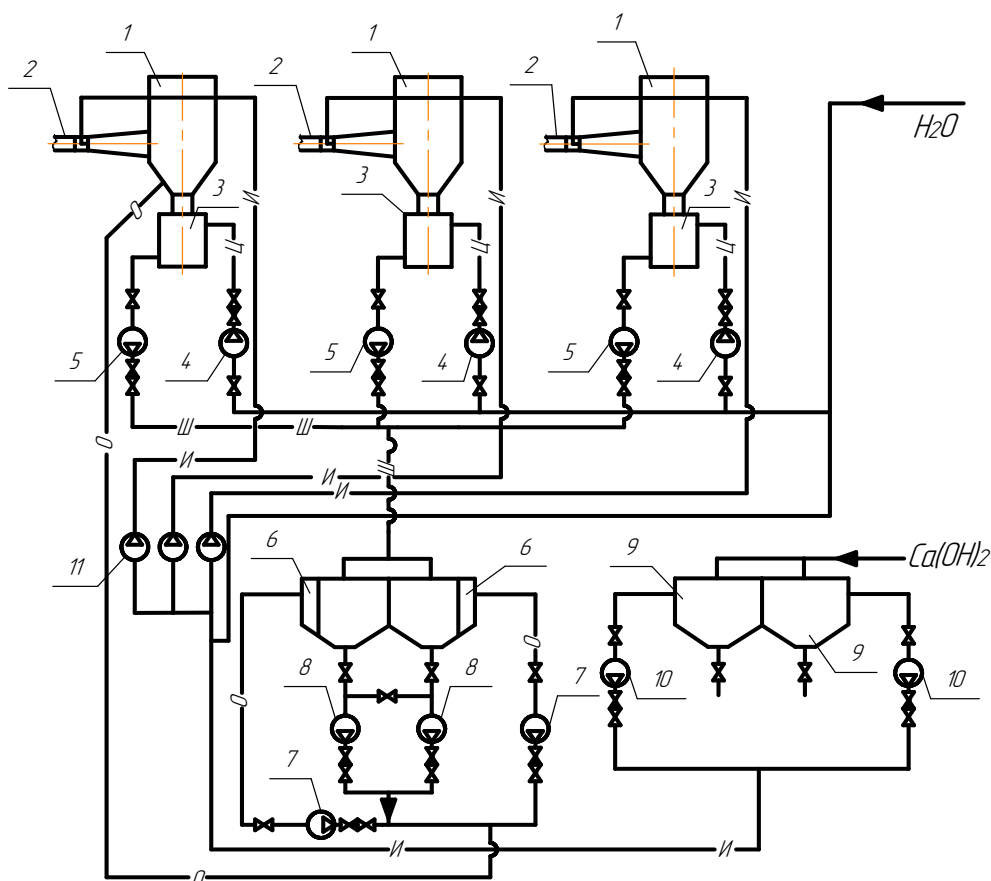


Рис. 3.33. Схема приготовления и подачи известкового молока в скруббер с трубой Вентури: 1 – скруббер; 2 – коагулятор Вентури; 3 – кристаллизатор; 4 – циркуляционный насос; 5 – шламный насос; 6 – отстойник; 7 – насос осветлённой воды; 8 – насос перекачки шлама в шламонакопитель; 9 – резервуар известкового молока; 10 – насос известкового молока; 11 – насос-дозатор известкового молока

На рис. 3.34 приведена схема очистки продуктов сгорания от SO₂ известковым методом, разработанная применительно к промышленному котлу.

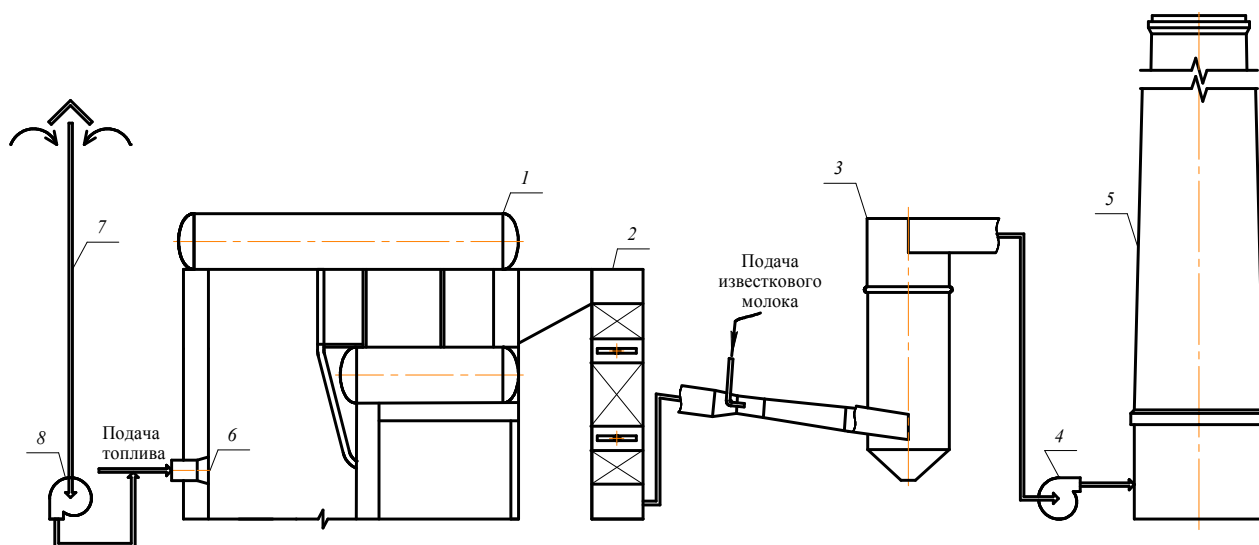


Рис. 3.34. Схема очистки продуктов сгорания от оксидов серы:
1 – котёл; 2 – экономайзер; 3 – скруббер с трубой Вентури; 4 – дымосос; 5 – дымовая труба; 6 – горелка; 7 – воздухозаборная шахта; 8 – вентилятор дугтевой

При использовании *циклического метода* можно в качестве товарного продукта получить гипс. Для этого отработавшая суспензия соединений кальция из абсорбера поступает в реактор для окисления сульфита кальция до сульфата под воздействием воздуха, подаваемого под давлением. Шлам сульфата кальция обезвоживают на центрифуге. Кристаллы сульфата кальция сушат и получают товарный гипс. Шлам отфильтровывают на центрифуге.

Преимущества метода: высокая степень очистки; дешевизна и доступность сырья. *Недостаток*: громоздкость метода; вредные стоки.

Сульфитный метод

Сульфитный способ очистки дымовых газов от оксидов серы осуществляется при низкой температуре порядка 40°C основан на реакции:



На рис. 3.35 приведена схема сульфитного способа очистки продуктов сгорания от оксидов серы с получением товарного продукта (серной кислоты) применительно к промышленным котлам, разработанная на основе схемы [37, рис. 3.3, С.68]. Образующийся раствор сульфит-бисульфит натрия поступает в испаритель – кристаллизатор, где при нагреве его до 110°C происходит

разложение бисульфита на сульфит натрия и диоксид серы:

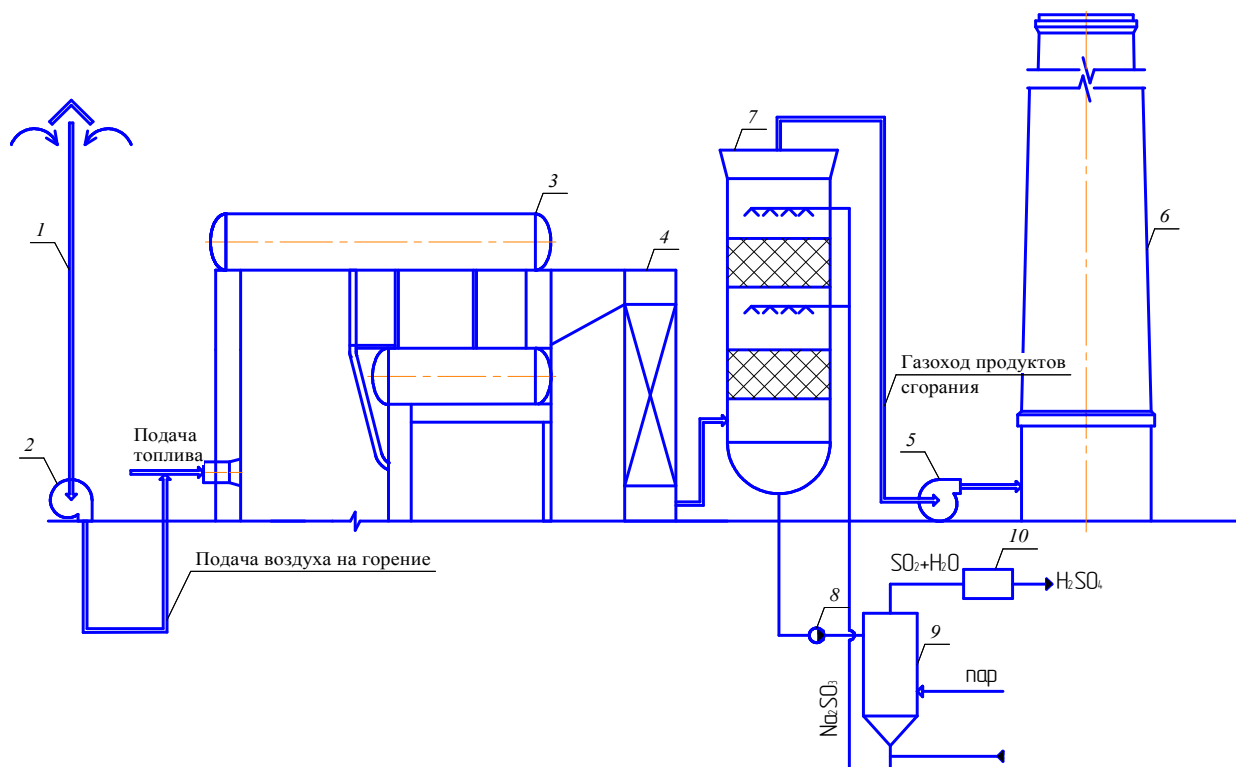
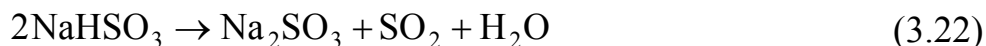


Рис. 3.35. Очистка продуктов сгорания от SO_2 сульфитным методом: 1 - шахта воздухозаборная, 2 - вентилятор дутьевой, 3 - котельный агрегат паровой, 4 - экономайзер, 5 - дымосос, 6 - труба дымовая, 7 - абсорбер, 8 - насос, 9 - кристаллизатор, 10 - оборудование для приготовления H_2SO_4

Выпар, состоящий из смеси двуокиси серы с парами воды, для конденсации паров воды охлаждается и подается на компримирование в качестве товарного продукта.

Сульфит натрия, образовавшийся в виде кристаллов, окисляется до сульфата натрия и выводится из системы; другая часть в виде раствора направляется снова в абсорбер.

Преимущества: высокая степень очистки от SO_2 (достигает 90 %).

Недостатки: громоздкость установки; наличие вредных стоков.

Аммиачный метод

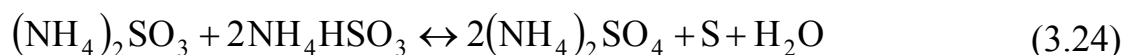
Достаточно близким к сульфитному методу является аммиачно-циклический метод, при котором очистке подвергается газ, охлажденный до $(30 \div 35)^\circ\text{C}$, раствором сульфита аммония по реакции:



Полученный раствор сульфит-бисульфит аммония подается в регенератор, где подвергается нагреванию до кипения, вследствие чего реакция смещается влево с выделением SO_2 и сульфита аммония. После охлаждения раствор подается повторно для улавливания SO_2 .

Часть регенерированного раствора направляется на выпарку под вакуумом. Из раствора выделяется сульфат аммония, образовавшийся при частичном окислении SO_2 в SO_3 .

Выделение других солей побочных реакций может быть осуществлено в автоклаве. При нагревании подаваемого в автоклав отрегенерированного раствора до 140°C происходит разложение сульфит-бисульфит солей с образованием сульфата аммония и серы по реакции:



Получаемая элементарная сера является дополнительным товарным продуктом этого метода.

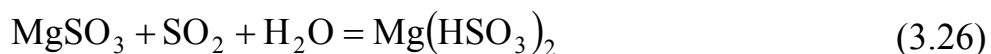
Аммиачно-циклический способ очистки газа позволяет получить сжиженный 100% сернистый ангидрид и сульфат аммония – продукты, которые могут найти широкое применение в народном хозяйстве. Количество отходов при этом способе очистки невелико.

Магнезитовый способ

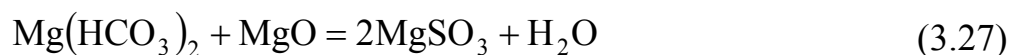
Магнезитовый метод очистки дымовых газов от оксидов серы проходит следующим образом. Связывание двуокиси серы происходит при взаимодействии ее с магнезитом по реакции:



Образовавшийся сульфит магния снова взаимодействует с водой и диоксидом серы, образуя бисульфит магния:



Образовавшийся бисульфит нейтрализуется добавлением магнезита:



Образовавшийся сульфит магния в процессе обжига при температуре $(800\div 900)^\circ\text{C}$ подвергается термическому разложению по реакции:



Оксид магния возвращается в процесс, а концентрированный SO_2 может быть переработан в серную кислоту или элементарную серу.

Схема очистки дымовых газов от оксидов серы магнезитовым способом (для энергетических котлов) с получением товарного продукта – сернистого ангидрида представлена на рис. 3.36 [37].

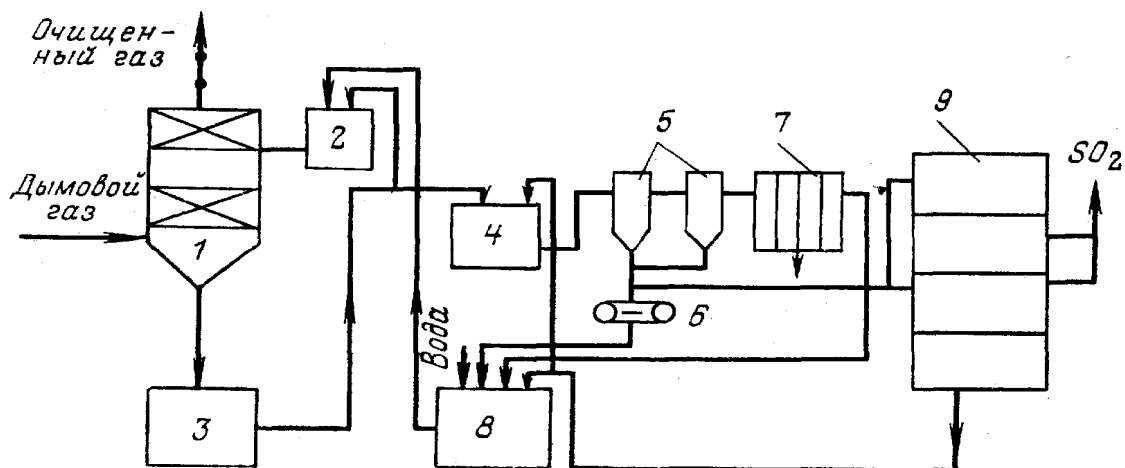


Рис. 3.36. Очистка продуктов сгорания от SO_2 магнезитовым методом: 1 – скруббер; 2 – напорный бак; 3 – циркуляционный сборник; 4 – нейтрализатор; 5 – гидроциклоны; 6 – ленточный вакуум-фильтр; 7 – фильтр-пресс; 8 – сборник осветленного раствора; 9 – обжиговая печь.

Газ очищается от оксидов серы до концентрации 0,03% в скруббере, а образовавшийся раствор бисульфита магния с концентрацией (50÷70)г/л поступает в циркуляционный сборник, откуда часть раствора подается в напорный бак и возвращается на орошение скруббера, а другая часть в нейтрализатор для выделения сульфита магния. Раствор из нейтрализатора выводится в гидроциклоны, затем пульпа направляется на ленточный вакуум-фильтр и затем в обжиговую печь, где образуются диоксид серы и магнезит, повторно используемый в цикле.

Маточный раствор и промывочная вода после фильтр-пресса поступает в сборник осветленного раствора. Куда добавляется магнезит из обжиговой печи. Раствор из сборника подается в напорный бак, где смешивается с кислым раствором из циркуляционного сборника и направляется на орошение скруббера. Степень очистки газов от SO_2 составляет (90÷92)%.

Достоинством магнезитового способа является возможность достижения высокой степени очистки газов без предварительного их охлаждения.

Обжиг сульфита магния может производиться на химическом предприятии, т.к. высушенные и обезвоженные кристаллы достаточно удобно транспортируются.

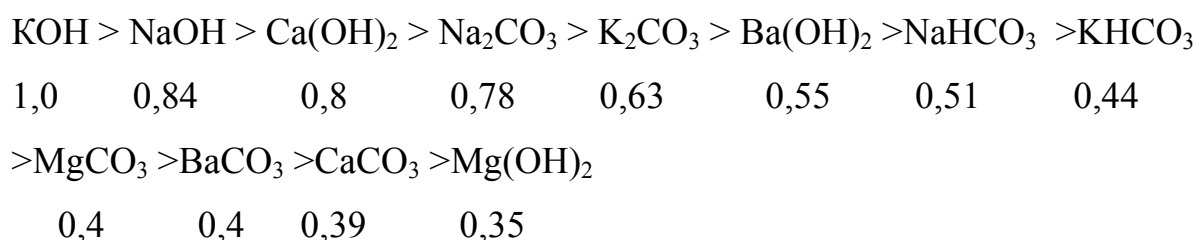
Основным *недостатком* магнезитового способа является наличие многочисленных операций с твердыми веществами (кристаллами сульфита, оксида магния), что связано с абразивным износом аппаратуры и пылением. Для сушки кристаллов и удаления гидратной влаги требуется значительное количество теплоты.

Преимущества всех методов абсорбционной очистки заключаются в высокой степени очистки – (85–90)%.

Основной *недостаток* методов – отложение кристаллов солей, перечисленных в каждом из методов, на поверхности аппаратуры и труб из-за малой растворимости. Кроме того, очищенные охлажденные газы плохо рассеиваются, поэтому требуют значительного количества теплоты для их *подогрева* перед выбросом в атмосферу.

Абсорбционная очистка продуктов сгорания от оксидов азота

Наиболее распространенный метод *абсорбционной очистки* от оксидов азота – использование щелочных растворов. Активность щелочных растворов убывает в следующей последовательности:



Процесс абсорбции оксидов азота щелочами протекает аналогично процессу абсорбции оксидов серы.

Окислительно-сорбционная очистка выбросов от оксидов азота используется в системах очистки выбросов от оксидов азота с целью перевода оксидов азота NO, NO₂ в высшие оксиды N₂O₅ (см. подробно в разделе 3.3).

3.2.4. Способы очистки продуктов сгорания от золы

Наибольшее количество золы выбрасывается энергетическими установками, использующими твёрдое топливо (см. табл. 3.6).

Таблица 3.6

Значения выброса в атмосферу твердых частиц при сжигании органического топлива

Потребители теплоты	Уголь кг/ГДж	Жидкое топливо кг/ГДж	Природный газ, кг/ГДж
Тепловые электростанции	0,44	0,025	0,0060
Промышленные котлы и печи	0,44	0,025	0,0075
Домовые котельные	0,44	0,036	0,0080

Выброс золы с продуктами сгорания определяется содержанием минеральных (негорючих) примесей в рабочей массе топлива A^r . Например, Экибастузский уголь марки СС имеет зольность $A^r = 40\%$ а Кузнецкий БР - $A^r = 15\%$. Естественно, что при одинаковых условиях сжигания содержание частиц золы в продуктах сгорания в первом случае будет в 2,7 раза выше. Поэтому те котельные, работающие на твердом топливе, для которых выполняется условие $A^r \times B \geq 1400$ обязательно оборудуют золоулавливающими установками.

Определяющими параметрами при выборе того или иного типа золоуловителя являются: количество улавливаемой золы, ее дисперсный состав и физические свойства, а также требуемая степень очистки. Дисперсный состав золы зависит не только от вида и качества топлива, но и от способа его сжигания. В табл. 3.7 приведен фракционный состав золы при сжигании твердого топлива в различных топочных устройствах [27].

Таблица 3.7

Фракционный состав золы при сжигании твердого топлива в различных топках, %

Топки для сжигания	Размер золовых частиц, мкм						
	0-10	10-20	20-30	30-40	40-74	74-148	≥ 149
С цепными решетками	-	11	-	-	12	30	47
Пылеугольные с сухим шлакозолоудалением	25	24	16	14	13	6	2
Циклонные	72	15	6	2	-	5	-

Эффективность работы газоочистительных устройств в большей степени зависит от физико-химических свойств улавливаемой золы и поступающих в золоуловитель газов.

Основные виды золоулавливающего оборудования, их конструкции, способ действия и область применения подробно представлены в методическом пособии «Экозащитное оборудование в системах теплогазоснабжения» [42].

Примечание: Золоуловители, применяемые в энергетике, разделяют на следующие основные группы:

- механические сухие инерционные золоуловители, в которых частицы золы отделяются от газа под действием центробежных или инерционных сил тяжести;
- мокрые золоуловители, в которых частицы золы удаляются из газа промывкой или орошением его водой с последующим осаждением частиц золы на смачиваемых поверхностях или улавливанием частиц на водяной пленке;
- электрофильтры, в которых частицы золы улавливаются осаждением их на электродах под действием электрических сил;
- тканые рукавные фильтры, в которых отверстия для прохода газа имеют размеры, меньшие размеров твердых частиц;
- комбинированные золоуловители, сочетающие *различные способы очистки*.

На рис. 3.37 приведена наиболее распространенная схема очистки применительно к *промышленным котлам*. Она включает золоулавливающее оборудование в виде блока циклонов (поз.4).

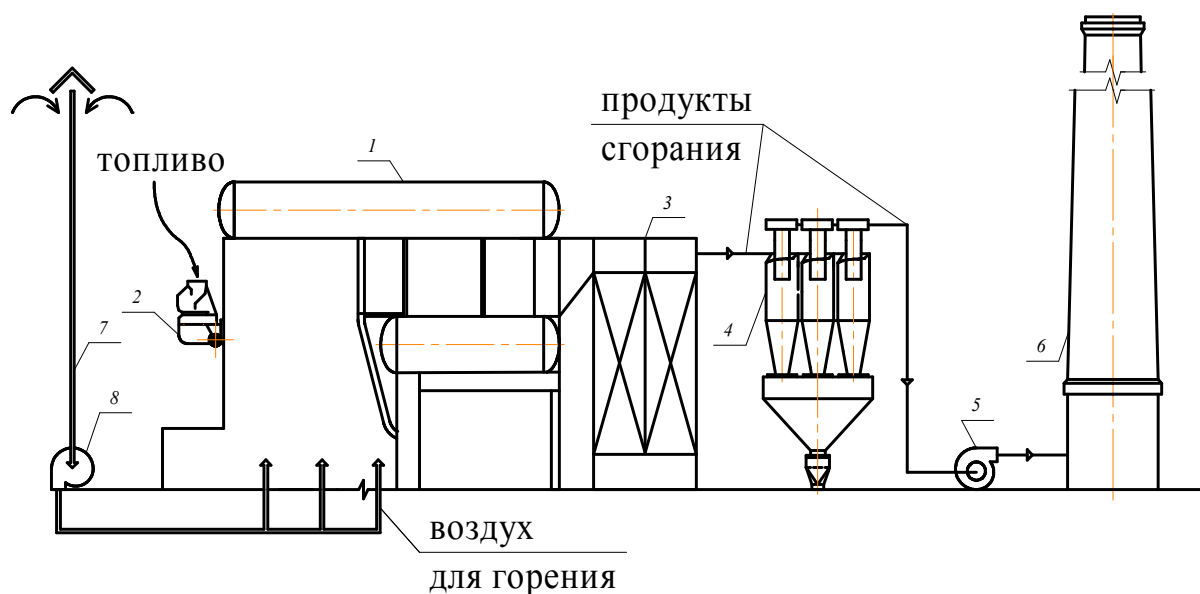


Рис. 3.37. Схема сухой инерционной очистки продуктов сгорания от частиц золы: 1 – котел типа ДКВР; 2 – пневмомеханический забрасыватель твердого топлива; 3 – экономайзер; 4 – блок циклонов; 5 – дымосос; 6 – дымовая труба; 7 – воздухозаборная шахта; 8 – вентилятор дутьевой

Использование сухих инерционных аппаратов данного типа предпочтительно, если необходимая степень очистки не превышает (70-80)%.

Аппараты сухой очистки

Характеристики некоторых аппаратов механической очистки выбросов котельных установок приведены ниже.

Наиболее распространенными аппаратами для сухого золоулавливания являются циклоны НИИОГАЗ – ЦН-11, ЦН-15, ЦН-15у, ЦН-24у (цифры обозначают угол наклона крышки входного патрубка).

В табл. 3.8 представлена техническая характеристика одиночных циклонов ЦН-15 различных типоразмеров при скоростях воздушного потока в корпусе циклона 2,5 и 4 м/с

Одиночные циклоны работают эффективно лишь при относительно малых диаметрах (200-500).

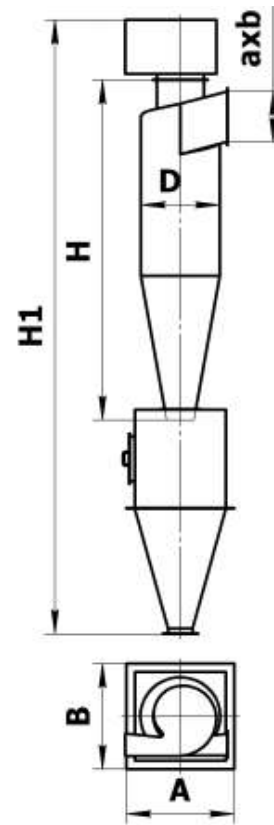


Рис. 3.38. Циклон одиночный

Увеличение диаметра циклона приводит к резкому снижению степени очистки ввиду уменьшения центробежных сил. Поэтому целесообразно в крупных котельных устанавливать вместо одиночных циклонов группы циклонов меньшего диаметра (табл. 3.8) для эффективной очистки продуктов сгорания от твердых частиц.

Таблица 3.8

Техническая характеристика одиночных циклонов ЦН-15

Типоразмер	Производительность, м ³ /час при скорости воздушного потока в корпусе циклона		D, мм	H1, мм	H, мм	a × b, мм	A × B, мм
	2,5 м/с	4 м/с					
ЦН-15-200х1УП	283	452	200	1876	912	132х52	436х436
ЦН-15-300х1УП	630	1 000	300	2508	1368	198х78	606х606
ЦН-15-400х1УП	1 100	1 800	400	3080	1824	264х104	706х706
ЦН-15-500х1УП	1 800	2 800	500	3942	2280	330х130	806х806
ЦН-15-600х1УП	2 500	4 100	600	4544	2736	396х156	930х930
ЦН-15-700х1УП	3 500	5 500	700	5206	3192	462х182	1030х1030
ЦН-15-800х1УП	4 500	7 200	800	6028	3648	528х208	1115х1115
ЦН-15-900х1УП	5 700	9 200	900	6742	4104	594х234	1230х1230

Техническая характеристика циклонов ЦН-15 группового исполнения с камерой очищенного газа в виде сборника твердых частиц представлена в табл. 3.9.

Золовыпускное отверстие бункера имеет размер 200×200 мм, 300×300 мм, или изготавливается под затвор или шлюзовой перегрузчик.

При нерегулярном выпуске золы происходит переполнение бункера, что недопустимо, так как при этом коэффициент очистки уменьшается и создаётся возможность забивания циклонов твёрдыми частицами.

Представленные на рис. 3.38 одиночные циклоны ЦН-15 и блоки циклонов (рис. 3.39) изготавливаются ООО «ВЕНТ-ОБОРУДОВАНИЕ – Тверь».

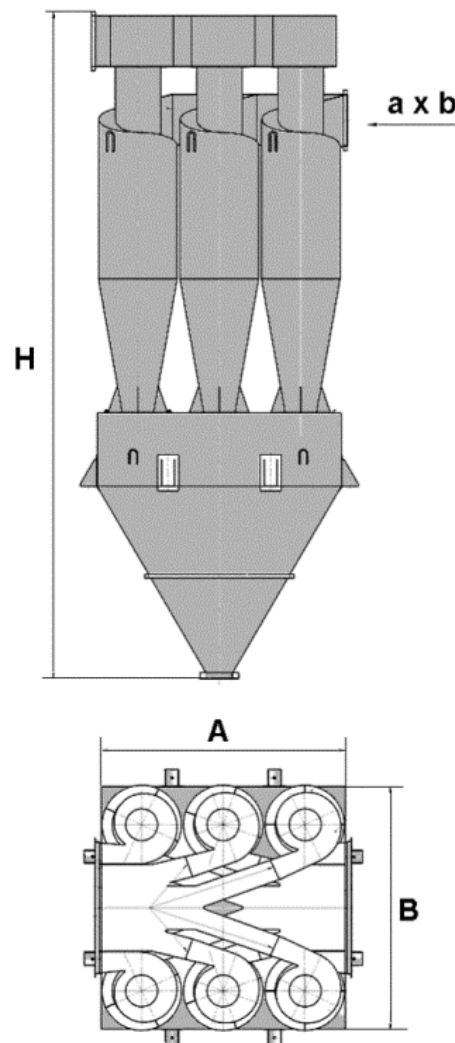


Рис. 3.39. Блок циклонов ЦН-15

Таблица 3.9

Техническая характеристика блоков циклонов ЦН-15

Типоразмер	Производительность, м ³ /час при скорости воздушного потока в корпусе циклона		D, мм	H, мм	a × b, мм	A × B, мм
	2,5 м/сек	4 м/сек				
ЦН-15-300x2СП	1270	2000	300	2940	206x184	700x500
ЦН-15-400x2СП	2300	3600	400	3580	274x242	800x600
ЦН-15-500x2СП	3500	5600	500	4230	340x294	1100x700
ЦН-15-600x2СП	5100	8100	600	4780	406x346	1200x800
ЦН-15-700x2СП	6900	11100	700	5520	472x398	1400x800
ЦН-15-800x2СП	9000	14400	800	6170	538x450	1600x900
ЦН-15-900x2СП	11400	18300	900	6860	604x502	1800x1000
ЦН-15-400x4СП	4500	7200	400	3700	474x274	800x1000
ЦН-15-500x4СП	7000	11300	500	4350	578x340	950x1200
ЦН-15-600x4СП	10200	16300	600	5000	682x406	1150x1450

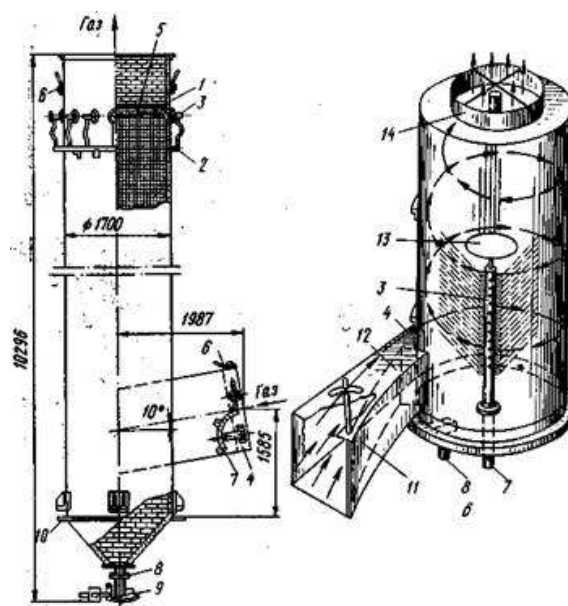
Аппараты мокрой очистки

Наибольшее распространение из аппаратов мокрой очистки, применительно к котлам малой и средней мощности, получили центробежные скрубберы и скрубберы Вентури.

Центробежные скрубберы относятся к жидкоплёночным аппаратам газоочистки. Они работают более эффективно, чем циклоны. Твёрдые частицы, отброшенные к стенкам, захватываются плёнкой воды и выводятся из газового потока. В большинстве случаев продукты сгорания вводят в нижнюю часть аппаратов и выводят прямоточно через верхнюю их часть. Скрубберы в зависимости от движения газа выполняют левого и правого вращения.

На рис. 3.40 показана конструкция центробежного скруббера для очистки продуктов сгорания. Скорость газа по сечению цилиндрической части аппаратов рекомендуют выбирать от 2,5 до 5,5 м/с. При большей скорости газа происходит брызгоунос. Для производственно-отопительных котельных целесообразно принимать центробежные скрубберы с диаметром корпуса до 2 м. Чем больше размеры частиц твёрдых частиц, чем меньше диаметр цилиндрической части аппарата и больше скорость в его входном патрубке, тем лучше очищаются продукты сгорания в центробежных аппаратах.

Рис. 3.40. Центробежные скрубберы ЦС-ВТИ:
1 – корпус; 2 – коллектор орошения; 3 – сопло; 4 – входной патрубок; 5 – сопло; 6 – брызгоотбойный козырек; 7 – люк; 8 – система орошения патрубка; 9 – патрубок для вывода шлама; 10 – гидрозатвор; 11 – опорное кольцо; 12 – ручка дросселя; 13 – дроссель; 14 – распылительный диск; 15 – каплеосадитель



Скрубберы Вентури относятся к промывным аппаратам газоочистки. Они имеют распыливающие элементы в виде орошаемых труб Вентури, соеди-

ненные с каплеуловителями. Труба Вентури приведена на рис. 3.41, а характеристики представлены в табл. 3.10.

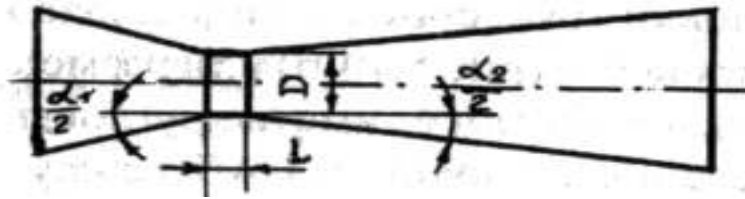


Рис. 3.41. Конструкции трубы Вентури: 1 – конфузор; 2 – горловина; 3 – диффузор; α_1 – угол сужения конфузора; α_2 – угол расширения диффузора; D – диаметр горловины

Скорость потока начинает расти в конфузоре и достигает в горловине (40-150)м/с, куда поступает промывочная жидкость. Диспергируясь, жидкость вместе с потоком поступает в диффузор. Однако приобретенная каплями скорость жидкости оказывается существенно меньшей скорости потока и частиц. Процесс осаждения пыли на каплях становится сходным с процессом осаждения в зернистом фильтре с подвижной насадкой. Из диффузора газовый поток выносит капли жидкости с осевшими на них частицами пыли в каплеуловитель (рис. 3.42), где происходит сепарация взвешенных частиц.

По величине гидродинамического сопротивления труб Вентури различают низконапорные и высоконапорные. Низконапорные с сопротивлением распылителя до 5 кПа применяются для улавливания пыли с размерами более 20 мкм. Скрубберы с высоконапорными трубами Вентури могут осаждать частицы размером 0,5 мкм и выше. Оптимальные геометрические характеристики труб Вентури следующие: угол сужения конфузора $\alpha_1 = 15^\circ$ - 28° ; длина горловины $l = 0,15 D$; угол раскрытия диффузора $\alpha_2 = 6^\circ$ - 8° .

Для использования в промышленности разработан типоразмерный ряд высоконапорных скрубберов Вентури ГВПВ. В качестве каплеуловителей для них используются малогабаритные прямоточные циклоны. Аппараты предназначены для очистки газов с температурой до 400°C и начальной запыленностью до 30 г/м^3 ; в жидкости, подаваемой на орошение, запыленность не должна превышать 500 мг/л. При эксплуатации труба Вентури может быть установлена в любом положении (вертикально, наклонно).

Техническая характеристика

Типоразмер трубы	Производительность (по условиям выхода), м ³ /ч	Расход орошающей жидкости, м ³ /ч	Давление жидкости перед форсункой, кПа (кгс/см ²)	Масса, кг
ГВПВ-0,006 ГВПВ-0,006-0,1	1700 – 3500	1,18 – 3,2 3,2 – 6,84	180-370 (1,8-3,7) 60-130 (0,6-1,3)	74 75
ГВПВ-0,010 ГВПВ-0,010-01	3100-6500	2,16 – 5 5 – 12,6	80-410 (0,8-4,1) 60-400 (0,6-4)	123 128
ГВПВ-0,014 ГВПВ-0,014-01	4140-8400	2,9 – 5 5 – 16,8	80-410 (0,8-4,1) 60-700 (0,6-7)	150 155
ГВПВ-0,019 ГВПВ-0,019-01	5590-11340	3,9 – 13 13 – 22,7	80-980 (0,8-9,8) 420-710 (4,2-7,1)	192 195
ГВПВ-0,025 ГВПВ-0,025-01	7490-15120	5,2 – 13 13 – 30	150-980 (1,5-9,8) 80-450 (0,8-4,5)	251 265
ГВПВ-0,030 ГВПВ-0,030-01	9320-18900	6,5 – 13 13 – 38	60-250 (0,6-2,5) 100-910 (1-9,1)	303 288
ГВПВ-0,045 ГВПВ-0,045-01	13800-28000	9,75 – 30 30 – 56	60-570 (0,6-5,7) 110-390 (1,1-3,9)	396 431
ГВПВ-0,060 ГВПВ-0,060-01	18630-37800	13 – 30 30 – 75,6	100-570 (1-5,7) 110-710 (1,1-7,1)	522 559
ГВПВ-0,140 ГВПВ-0,140-01	41400-84000	28,8 – 45 45 – 168	130-320 (1,3-3,2) 60-800 (0,6-8)	1120 1130

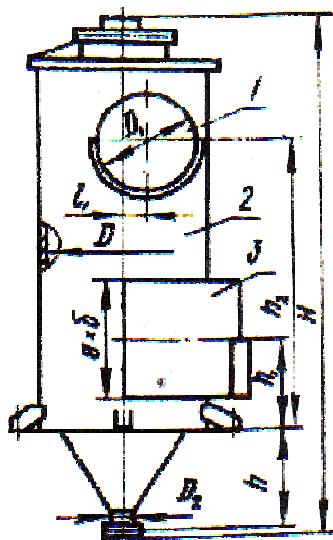


Рис. 3.42. Каплеуловитель типа КЦТ: 1 – выходной патрубок; 2 – корпус; 3 – входной патрубок

Каплеуловитель представляет собой малогабаритный прямоточный циклон с входным патрубком прямоугольного сечения и выходным патрубком круглого сечения. Материал основных деталей: корпус, патрубки – сталь ВСт 3 или 12Х18Н10Т. Изготовитель ЗАО «УК Кондор-Эко».

КЦТ – каплеуловитель центробежный с тангенциальным подводом газа для улавливания капель жидкости с осевшими на них частицами пыли.

В основном устанавливаются за трубами Вентури типа ГВПВ. Могут быть также использованы в качестве самостоятельной ступени очистки при улавливании пылей размером частиц более 5 мкм.

Характеристика каплеуловителя

Концентрация жидкости в газе, поступающем в аппарат, л/м ³ , не более*	1
Предельная температура очищаемого газа, °С	80
Скорость газа в свободном сечении аппарата, м/с	3,5 – 5
Гидравлическое сопротивление, Па (кгс/м ²)	350 (35)
Концентрация капельной влаги на выходе, мг/м ³	70

Примечание: При более высокой концентрации жидкости в газе избыточную влагу необходимо предварительно улавливать в специальных устройствах.

Радиационно-химические методы очистки дымовых газов

Кроме того, в последние годы в Японии, США и России проводятся исследования радиационно-химических методов очистки дымовых газов. Эти методы основаны на получении в очищаемом газе небольшого количества активных компонентов (атомов и радикалов), которые образуются при воздействии радиационного излучения. В наибольшей степени подготовлен к промышленному внедрению метод радиационной обработки очищаемого газа электронным пучком. Этот метод позволяет очищать дымовые газы одновременно от оксида азота и сернистого ангидрида.

При прохождении быстрых электронов через газ, содержащий азот, кислород и водяные пары, образуются продукты радиолиза, которые после завершения процесса нейтрализации образовавшихся ионов содержат атомы азота в основном и возбужденном состоянии, а также радикалы OH, NO₂ и атомы O. Именно эти компоненты приводят к окислению NO до NO₂, который, в свою очередь, реагирует с OH, в результате чего образуется HNO₃. При радиолизе CO₂, количество которого в дымовых газах достаточно велико, образуются молекулы CO, которые также увеличивают степень разрушения молекул NO [25].

3.3. Комплексные схемы очистки выбросов токсичных веществ в атмосферу

Комплексными являются схемы, в которых используется комплекс мероприятий, направленный на снижение *различных* токсичных веществ или одного вещества, но *разными способами*.

Комплексные схемы разбиты на отдельные блоки, различающиеся

набором *экозащитного* оборудования и его элементов в зависимости от конструкции, срока службы котельного оборудования и требуемой степени очистки выбрасываемых в атмосферу продуктов сгорания.

Комплексные схемы предложены автором на основе представленных ранее методов очистки продуктов сгорания.

3.3.1. Комплексная схема (№1) очистки выбросов котлов от оксидов азота и продуктов неполного сгорания

В основу схемы №1 положен наиболее простой метод одновременной очистки выбросов от NO_x и продуктов неполного сгорания (CO , сажи, БП), не требующий значительной реконструкции топочных устройств [41].

Метод основан на проведении топочного процесса в условиях подавления образования NO_x с последующим дожиганием образовавшихся продуктов неполного сгорания в специальных *дожигательных* устройствах. Данная схема (рис. 3.43) состоит из двух блоков (1,2)

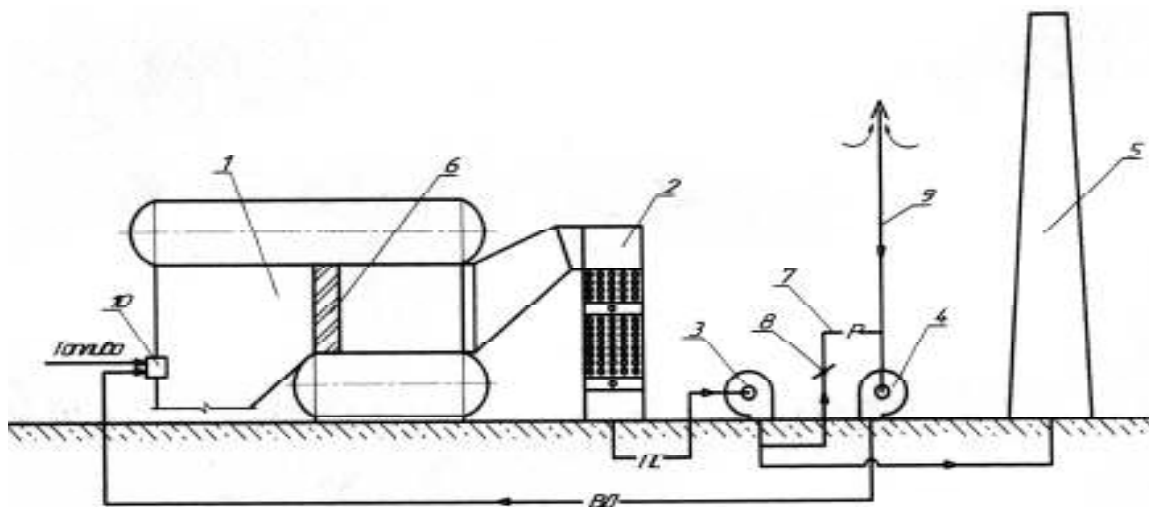


Рис. 3.43. Комплексная схема очистки продуктов сгорания (дожигание, рециркуляция): 1- котел типа ДКВР; 2 – экономайзер; 3 – дымосос; 4 – дутьевой вентилятор; 5 – дымовая труба; 6 – дожигательное устройство; 7 – газоход рециркуляции; 8 – шибер; 9 – шахта воздухозаборная; 10 – горелка; ВД – воздух дутьевой; ПС – продукты сгорания; Р – газоход рециркуляции газов в топку котла

1 – ый блок предназначен для снижения *оксидов азота технологическими* методами, то есть путем организации процессов горения по способам подавления образования NO_x [24, 25]. Эти методы позволяют за счет незначительной реконструкции газо-воздушного тракта достигнуть (30-50)%

очистки выбрасываемых дымовых газов от оксидов азота. В 1–ом блоке может быть использовано 3 вида технологических методов, отдельно или в совокупности:

- ступенчатое сжигание (блок 1а);
- подача воды в топочную камеру (блок 1б);
- рециркуляция продуктов сгорания в топочную камеру (блок 1в).

Тормозит использование технологических методов тот факт, что все они основаны на снижении топочных температур и коэффициента избытка окислителя, т.е. потенциально способствуют образованию и выбросу продуктов неполного сгорания, в том числе канцерогенного бенз(а)пирена.

Это подтверждено нормативной методикой по расчету выбросов загрязняющих веществ в атмосферу, согласно которой содержание бенз(а)пирена в продуктах сгорания увеличивается в 1,8 раза при рециркуляции и в 2,4 раза при ступенчатом сжигании. Кроме того, снижается КПД котлов, а, следовательно, увеличивается расход топлива.

Эти недостатки устраняются путем применения **блока 2**, включающего **дожигательное устройство (ДУ)**, предлагаемое автором [41] для устранения выброса продуктов неполного сгорания и углубления степени очистки от оксидов азота (конструкцию ДУ см. раздел 3.2.2).

3.3.2. Комплексные схемы (№2, №3) глубокой очистки продуктов сгорания от оксидов азота с дожиганием

Для глубокого снижения выброса оксидов азота предлагается сочетание **технологических** методов снижения токсичных оксидов азота и методов **восстановления** (*высокотемпературного* или *каталитического*) оксидов азота с дожиганием.

Комплексная схема №2 глубокой очистки от оксидов азота (высокотемпературное восстановление) и продуктов неполного сгорания

Схема гомогенного восстановления оксидов азота аммиаком применительно к энергетическим котлам представлена на рис. 3.25.

Данная комплексная схема разработана под руководством автора на основе патента RU 2293254 С2 «Способ очистки продуктов сгорания газообразного топлива от токсичных веществ» (опубликован 10.02.2007) применительно к промышленным котлам с учетом их особенностей, в частности малого объема топочной камеры

Комплексная схема состоит из 4 блоков: блок 1а – ступенчатое сжигание; блок 2 – дожигательное устройство; блок 3 – комплекс устройств по приготовлению аммиака (рис. 3.44) и вводу аммиака в *высокотемпературную* часть топочной камеры (дожигательное устройство)

В качестве газа-восстановителя в этом процессе используется аммиак, который действует селективно (избирательно). Поэтому этот процесс еще называют селективным некаталитическим восстановлением (процесс СНКВ). Процесс восстановления протекает при температуре $(930-9700)^{\circ}\text{C}$.

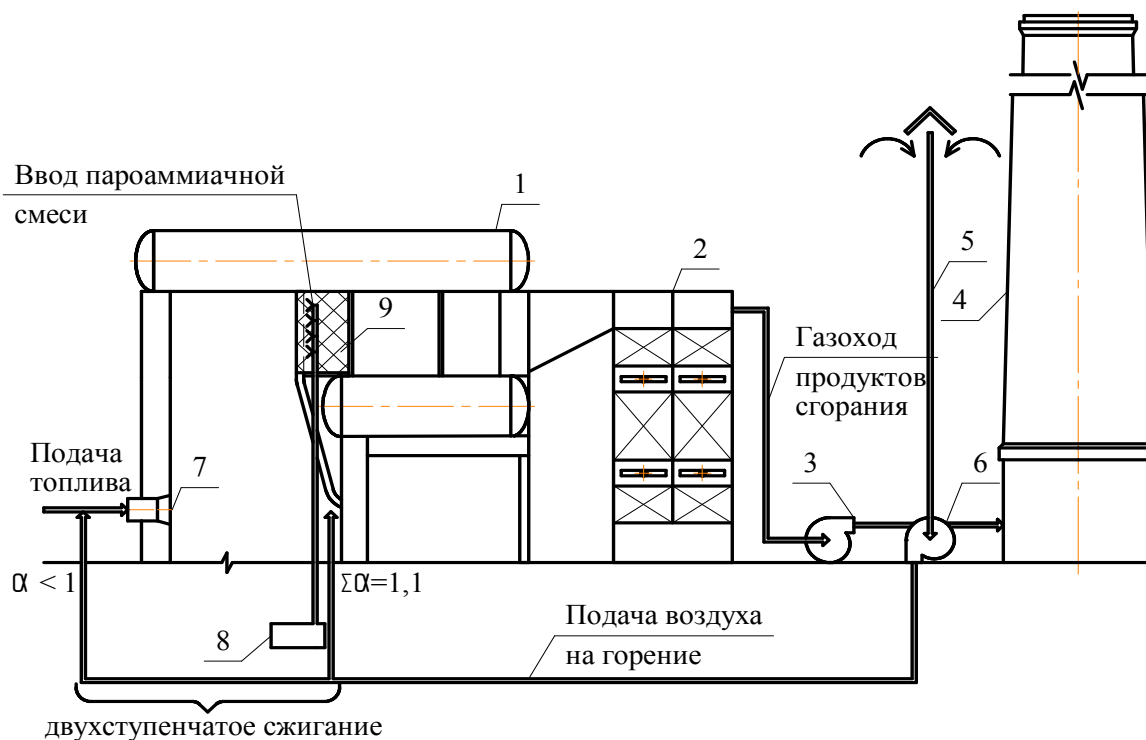


Рис. 3.44. Комплексная схема очистки продуктов сгорания природного газа от оксидов азота и продуктов неполного сгорания

- 1 – котёл; 2 – водяной экономайзер; 3 – дымосос; 4 – дымовая труба; 5 – воздушаборная шахта; 6 – дутьевой вентилятор; 7 – горелка; 8 – оборудование для приготовления пароаммиачной смеси; 9 – дожигательное устройство

**Комплексная схема №3 глубокой очистки от оксидов азота
(каталитическое восстановление) и продуктов неполного сгорания**

Данная комплексная схема состоит из 4 блоков: блок 1в – рециркуляция продуктов сгорания; блок 2 – дожигательное устройство; блок 3 – комплекс устройств по приготовлению аммиака (рис. 3.26) и вводу аммиака в газоход перед каталитическим реактором; блок 4 – каталитический реактор.

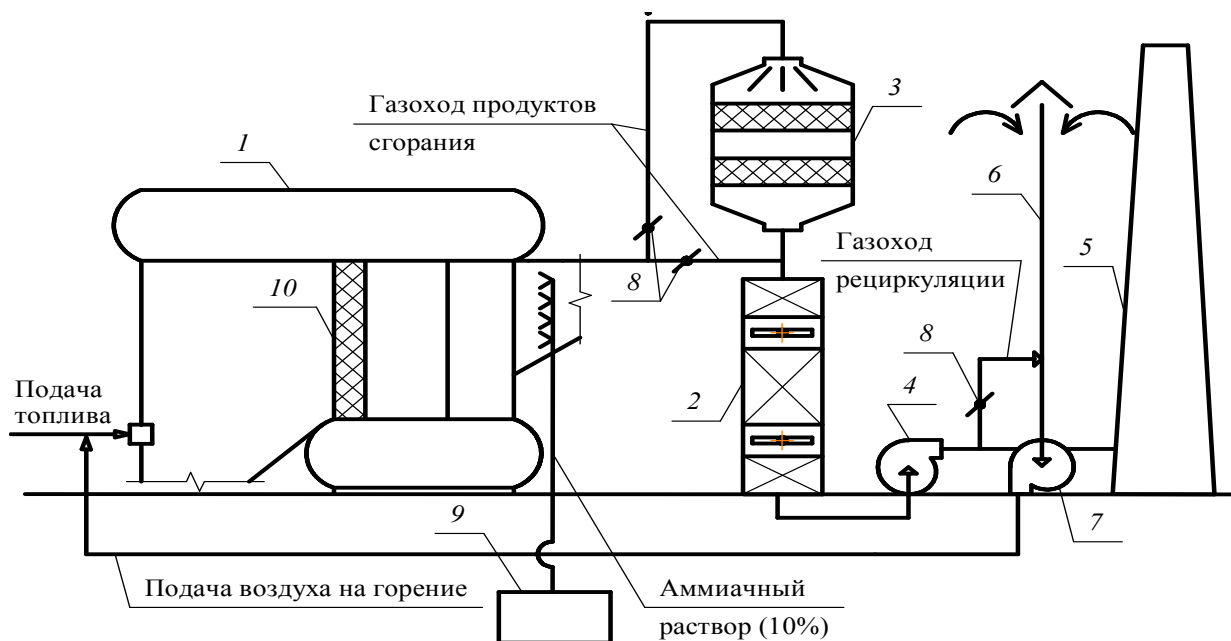


Рис. 3.45. Комплексная схема глубокой очистки от оксидов азота
1 – котёл; 2 – водяной экономайзер; 3 – реактор каталитический (восстановительный катализатор); 4 – дымосос; 5 – дымовая труба; 6 – шахта воздухозаборная; 7 – дутьевой вентилятор; 8 – шибер; 9 – оборудование для приготовления и подачи аммиака; 10 – дожигательное устройство

3.3.3. Комплексные схемы (№4, №5) глубокой очистки продуктов сгорания от оксидов азота и серы

Комплексные схемы глубокой очистки продуктов сгорания от оксидов азота и серы можно разделить на окислительно-абсорбционные и хемосорбционные.

Комплексная схема №4 глубокой очистки продуктов сгорания от оксидов азота и серы с использованием озонирования и физической сорбции

Комплексная **окислительно-сорбционная** схема №4 (рис. 3.46) включает блок окисления (блок 5) и блок физической абсорбции (блок 6).

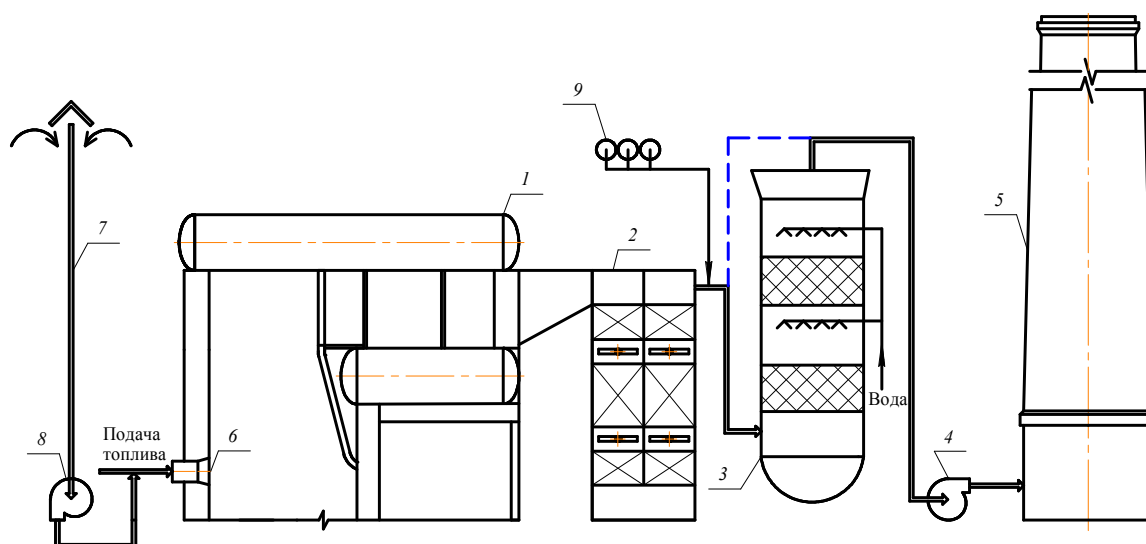


Рис. 3.46. Комплексная схема глубокой очистки продуктов сгорания от оксидов азота и серы: 1 – котёл; 2 – экономайзер; 3 – абсорбер; 4 – дымосос; 5 – дымовая труба; 6 – горелка; 7 – воздухозаборная шахта; 8 – вентилятор дутьевой; 9 – озонатор

При *физической абсорбции* обычно используют в качестве абсорбента *воду*, а также органические растворители, *не реагирующие* с извлекаемыми компонентами и их водными растворами. *Вода* – наиболее дешёвый и доступный абсорбент для очистки больших объёмом газа.

Однако оксид азота NO и диоксид серы SO₃ *слабо растворимы* в воде. Следовательно, перед поступлением в адсорбер их необходимо окислить до высших оксидов (SO₃, N₂O₅), *хорошо растворимых* в воде.

В качестве окислителей можно использовать озон, перекись водорода, ClO₂ и др. В предлагаемой комплексной схеме использован наиболее эффективный и доступный окислитель – *озон*. Эффективность озона обуславливается высокой скоростью реакций:



Эти реакции осуществляются за доли секунды (0,1-0,9 сек), что позволяет применять этот окислитель в энергетических установках.

Блок окисления (**блок 5**) состоит из *озонаторов*, системы транспортировки окислителя и устройства для равномерного распределения окислителя в продуктах сгорания.

Блок 6 представлен *абсорбером*, в котором распыливается вода. Высшие

оксиды азота и серы (SO_3 , N_2O_5), хорошо растворимые в воде, улавливаются орошающей жидкостью и превращаются в капли серной и азотной кислот.

По достижении определенных концентраций раствор этих кислот нейтрализуется *аммиаком* и в результате получаются *сульфат аммония и аммиачная селитра*, которые широко используются в качестве удобрения

Достижимая *степень очистки* продуктов сгорания от NO - 90%, от SO_2 - 80%.

Комплексная схема №5 глубокой очистки продуктов сгорания от оксидов азота и серы с использованием озонирования и хемосорбции

Схема состоит из блока приготовления абсорбента (*блок 7*) и скруббера (*блок 6*). В качестве абсорбента используются как правило растворы щелочей, а также можно применять любые из представленных в разделе 3.2.3).

При *химической абсорбции* молекулы абсорбента вступают в химическую реакцию с молекулами удаляемых веществ, образуя новое химическое соединение. В данной схеме рис. 3.42 в качестве абсорбента использовано известковое молоко (приготовление и подачу в абсорбер см. рис. 3.33).

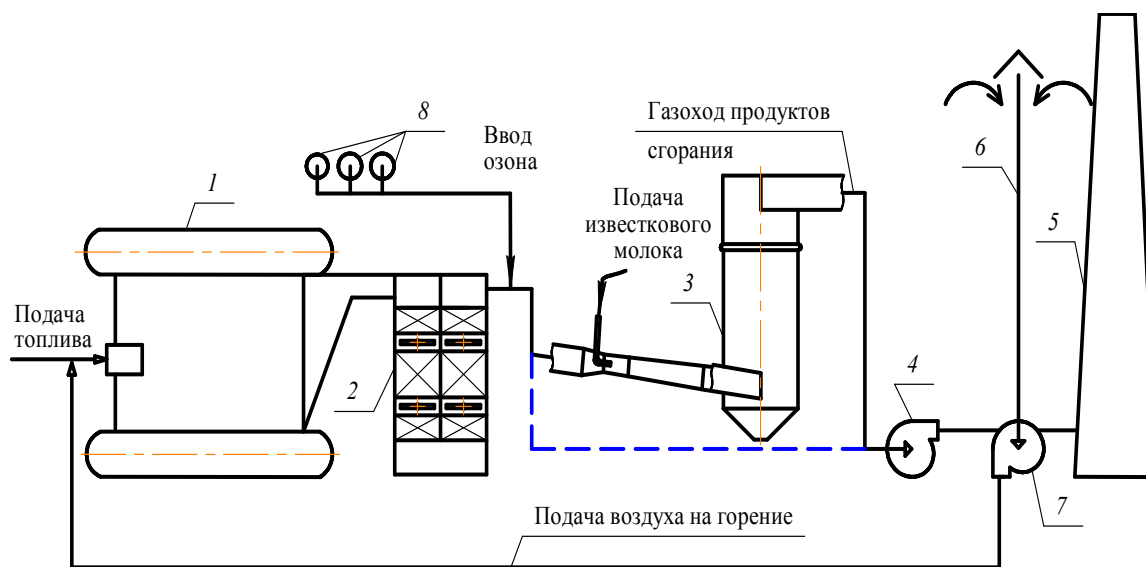


Рис. 3.47. Комплексная схема очистки продуктов сгорания от оксидов азота и серы: 1 – котёл; 2 – водяной экономайзер; 3 – скруббер с трубой Вентури; 4 – дымосос; 5 – дымовая труба; 6 – воздухозаборная шахта; 7 – дутьевой вентилятор; 8 – озонаторы

3.3.4. Комплексная схема №6 глубокой очистки продуктов сгорания от твердых частиц

В данной схеме возможно сочетание двух аппаратов разной степени сухой очистки (блок циклонов, электрофильтр) или аппарата сухой очистки (блок циклонов) и аппарата мокрой очистки – скруббера. В качестве примера приведена комплексная схема сухой очистки продуктов сгорания котлоагрегата на основе котла ДКВр.

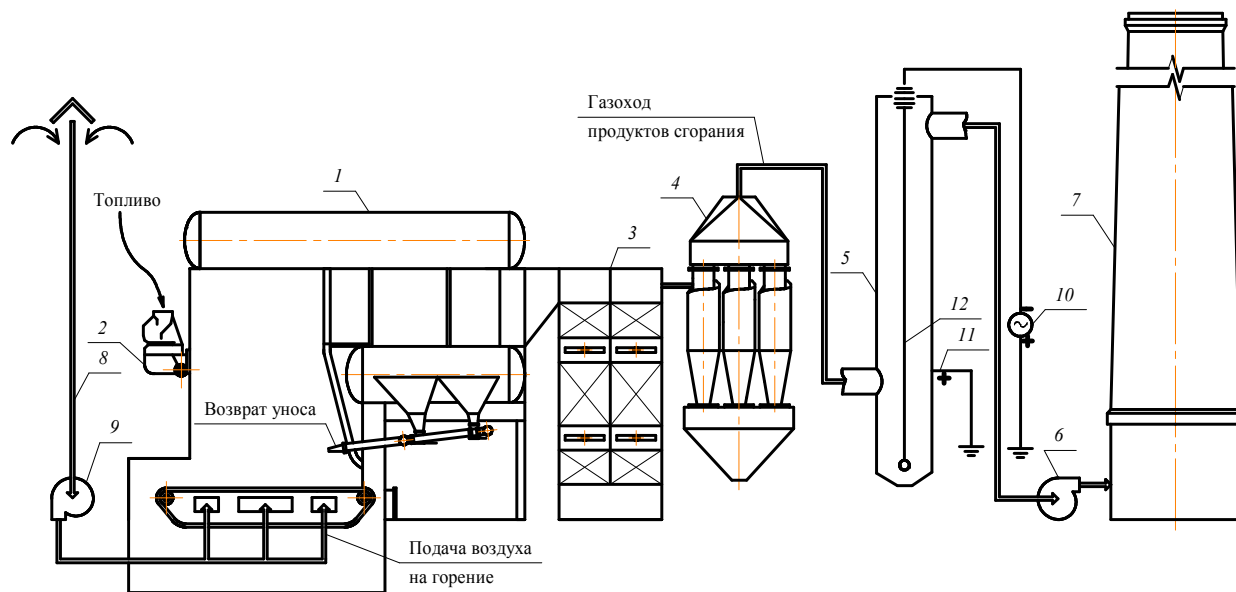


Рис. 3.48. Комплексная схема сухой очистки продуктов сгорания от твёрдых частиц: 1 – котел типа ДКВр; 2 – пневмомеханический забрасыватель твердого топлива; 3 – экономайзер; 4 – блок циклонов; 5 – электрофильтр; 6 – дымосос; 7 – дымовая труба; 8 – воздухозаборная шахта; 9 – вентилятор дутьевой; 10 – источник постоянного тока 11 – осадительный электрод; 12 – коронирующий электрод

Примечание: Оборудование для комплексных схем см. раздел 3.2.

3.4. Методы снижения выбросов топливной промышленности

Природоохранные мероприятия необходимо применять на всех стадиях энергетического комплекса – от добычи, переработки и транспортировки различных видов топлива до заключительной стадии – сжигания топлива.

3.4.1. Добыча и переработка нефти и газа

Для уменьшения загрязнения атмосферы газодобывающими предприятиями предусматривается целый комплекс мероприятий. Особое внимание уделяют месторождениям, в газе которых содержится сероводород. К технологическим природоохранным мероприятиям можно отнести следующие:

- правильный выбор материалов для оборудования, трубопроводов, арматуры, средств КИП и автоматики, работающих в кислых средах;
- герметизация системы по добыче, транспортировке и промышленной подготовке газа и углеводородного конденсата;
- уменьшение продолжительности продувки скважин;
- применение закрытой факельной системы для ликвидации выбросов сероводорода при продувке скважин, трубопроводов, при ремонте технологических установок.

Наиболее эффективным средством защиты воздушного бассейна является *очистка* топлива от сероводорода.

Очистка газа от сероводорода обычно осуществляется абсорбцией. Эффективным абсорбентом является моноэтаноламин и диэтаноламин.

Абсорбция сероводорода моноэтаноламином (рис. 3.49), происходящая при температуре $(30\div 40)^\circ\text{C}$, протекает согласно следующей реакции:

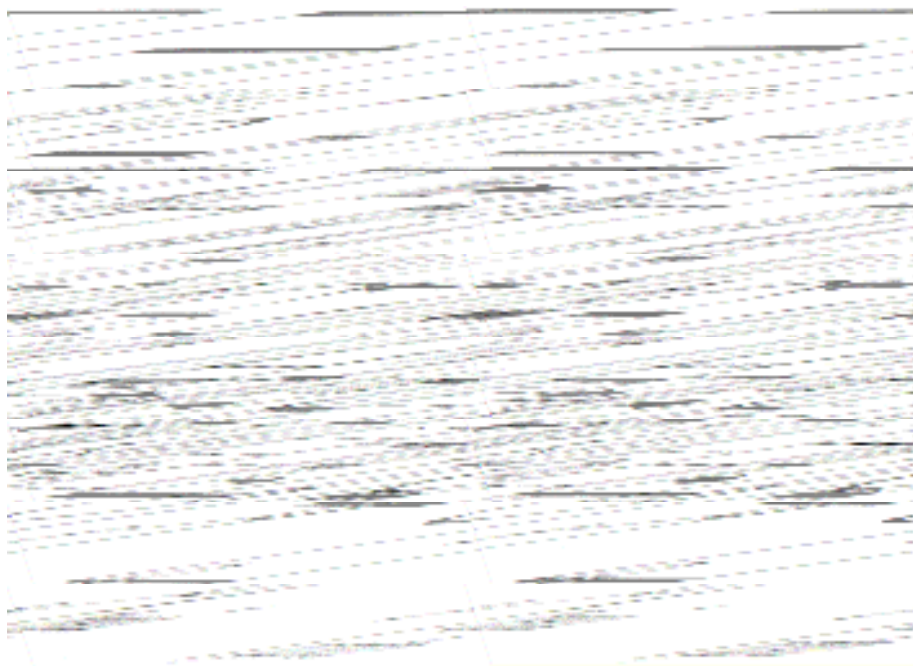


Рис. 3.49. Схема очистки горючего газа от H_2S : 1 – абсорбер; 2 – отгонная колонна (десорбер); 3 – теплообменник; 4 – холодильник; 5 – конденсатор; 6 – паровой подогреватель; 7 – сепаратор; 8 – насос.

При температуре 105°C реакция идет в обратном направлении с образованием моноэтаноламина и сероводорода, десорбируемого из раствора. Регенерированный раствор направляется обратно в абсорбер. Извлечение сероводорода и попутно некоторого количества двуокиси углерода из газа происходит в противоточном абсорбере, в котором сорбент насыщается H_2S и

CO₂. Отработанный сорбент направляется в отгонную колонну, в которой регенерация раствора производится водяным паром, образующимся в результате кипения раствора в нижней части колонны. На практике чаще применяется моноэтаноламин, так как он стабилен и обладает более активными свойствами. Эффективность очистки от H₂S при данном способе достигает 99%.

3.4.2. Снижение загрязнения атмосферы факелами газа

В практике эксплуатации объектов нефтяной и газовой промышленности применяют следующие *факельные системы*: низкого давления (менее 0,2 МПа) и высокого давления, обслуживающие установки под давлением более 0,2 МПа. Для обеспечения безаварийной работы установок комплексной подготовки газа (УПКГ) поддерживают постоянно горящие факела газа. При этом происходит неорганизованное сжигание природного газа, которое обуславливает неполноту сгорания и, как следствие, загрязнение прилегающей территории оксидами углерода, углеводородами, в том числе бенз(а)пиреном, а также сероводородом и другими вредными веществами.

В ГАНГ им. И.М. Губкина были разработаны оригинальные конструкции оголовков для факелов газонефтеперерабатывающих заводов, промыслов и других объектов, позволяющие помимо существенного улучшения сжигания сбросных газов повысить надёжность работы оголовков при сильных ветровых нагрузках [39]. В разработанных конструкциях осуществляется принудительная подача первичного воздуха к оголовку факела за счёт подаваемого пара (давление 0,7 МПа, расход (0,1–0,5) м³ на 1 м³ сбросных газов). Пар является своеобразным катализатором химических

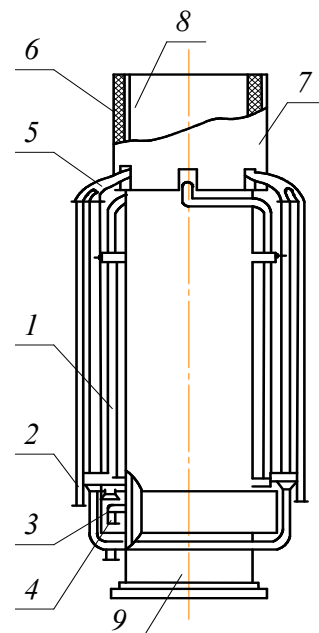


Рис. 3.50. Огнеупорно-стабилизирующий насадок факела:
1 – патрубок; 2 – паровой эжектор; 3 – паровой коллектор; 4 – сопло; 5 – пилотная горелка; 6 – огнеупорный блок; 7 – кожух; 8 – жаростойкая сетка; 9 – ствол факела

реакций горения углеводородов и способствует подавлению образования сажи, бенз(а)пирена и оксидов азота (см. рис. 3.50). Наибольший экономический и экологический эффект достигается при сочетании продувки факела заранее подготовленной газоздушной смесью и установки огнеупорно-стабилизирующего насадка.

Таблица 3.12

Технологическая характеристика насадка

Наименование	Факел высокого давления	Факел низкого давления
Расход продувочного газа, м ³ /ч	600	150
Диаметр парового сопла, мм	3	2
Наружный диаметр насадка, мм	1668	900
Высота блоков, мм	1500	800
Толщина огнеупорных блоков, мм	30	30
Количество жаростойких сеток, шт.	3	3
Общий вес насадка, кг	340	120

3.5. Примеры расчета

Пример 3.1. Определить высоту дымовой трубы для производственно-отопительной котельной установки, работающей на природном газе. Климатический район: г. Н. Новгород. Расчёт вести для зимнего периода.

Исходные данные принять по **примеру 1.2** данного пособия: 4 паровых котла марки ДКВр-10-13 с водяными экономайзерами, теплота сгорания природного газа 36 МДж/м³; расход топлива котельной установкой 0,81 м³/с; масса диоксида азота 1,76 г/с (или 1,18 г/с при применении в качестве природоохранного мероприятия ступенчатого сжигания ($\delta=15\%$)). Расход продуктов сгорания на выходе из дымовой трубы: $V_{yx}=16,5$ м³/с. Фоновые концентрации загрязнителей принять $c_{NO_2}^{\phi}=0,09$ мг/м³; $c_{SO_2}^{\phi}=0,22$ мг/м³.

Решение:

Параметр	Обозначение	Обоснование или формула	Значение	Ед. изм.
Коэффициент температурной стратификации атмосферы	A	для Нижегородской области	160	
Коэффициент, учитывающий скорость оседания вредных веществ в атмосфере	F	для газообразных частиц	1	
Коэффициенты, учитывающие условия выхода смеси из устья источника	m, n	принимаем	1	
Коэффициент, учитывающий рельеф местности	η	в общем случае	1	
Температура продуктов сгорания на выходе из дымовой трубы	θ_{yx}	при сжигании природного газа	130	°С
Температура окружающего воздуха	t_n	[СНиП 23-01-99*, табл. 3]	-11,8	°С
Разность между температурами	ΔT	ф-ла (3.7)	141,8	°С

Параметр	Обозначение	Обоснование или формула	Значение	Ед. изм.
Высота дымовой трубы (без применения природоохранных мероприятий)				
- без учёта фоновых концентраций	H	ф-ла (3.5)	10,4	м
- с учётом фоновых концентраций	H	ф-ла (3.3)	32,6	м
Высота дымовой трубы (при использовании ступенчатого сжигания)				
- без учёта фоновых концентраций	H	ф-ла (3.5)	8,4	м
- с учётом фоновых концентраций	H	ф-ла (3.3)	26,7	м

Вывод: минимальная высота дымовой трубы при использовании ступенчатого сжигания снизилась на 5,9 м (с учётом фоновых концентраций).

Пример 3.2. Определить кратность рециркуляции в существующей схеме очистки продуктов сгорания.

Исходные данные: котлоагрегат ДКВр-10-13, работающий на природном газе. Теоретические объёмы: воздуха, необходимого для сжигания $V_{\text{в}}^0=9,31 \text{ м}^3/\text{м}^3$; продуктов сгорания $V_{\text{г}}^0=10,48 \text{ м}^3/\text{м}^3$. Коэффициент избытка воздуха на входе в топку $\alpha'_{\text{т}}=1,05$. Содержание кислорода в продуктах сгорания $O_2=7\%$. Расчётные температуры: уходящих газов $t_{\text{г}}=130^\circ\text{C}$; холодного воздуха $t_{\text{в}}=30^\circ\text{C}$; смеси $t_{\text{см}}=40^\circ\text{C}$.

Решение:

В процессе внедрения схем рециркуляции и их последующей эксплуатации возникает необходимость проверки кратности рециркуляции по значениям отдельных параметров работы газоздушного тракта, в том числе температур холодного воздуха $t_{\text{в}}$, смеси рециркулирующих газов с дутьевым воздухом $t_{\text{см}}$ и содержания кислорода в отбираемых продуктах сгорания O_2 .

Кратность рециркуляции определяется по формуле:

$$r = \frac{\alpha'_{\text{т}} \cdot (21 - O_2)}{\left(\frac{V_{\text{г}}^0}{V_{\text{в}}^0} + \alpha'_{\text{т}} - 1 \right) \cdot \left(21 \cdot \frac{c_{\text{г}} \cdot t_{\text{г}} - c_{\text{см}} \cdot t_{\text{см}}}{c_{\text{см}} \cdot t_{\text{см}} - c_{\text{в}} \cdot t_{\text{в}}} + O_2 \right)}, \quad (3.32)$$

где $\alpha'_{\text{т}}$ – коэффициент избытка воздуха на входе в топку; O_2 – содержание кислорода в продуктах сгорания, %; $V_{\text{г}}^0$ – теоретический объём продуктов сгорания, $\text{м}^3/\text{м}^3$; $V_{\text{в}}^0$ – теоретический объём воздуха, необходимого для сжигания, $\text{м}^3/\text{м}^3$; $t_{\text{г}}$, $t_{\text{в}}$, $t_{\text{см}}$ – температуры продуктов сгорания, холодного воздуха, смеси уходящих газов с холодным воздухом, $^\circ\text{C}$; $c_{\text{г}}$, $c_{\text{в}}$, $c_{\text{см}}$ – средние изобарные объёмные теплоёмкости продуктов сгорания, холодного воздуха, смеси уходящих газов с холодным воздухом в интервале температур от 0°C до соответствующей температуры, $\text{кДж}/(\text{м}^3\text{C})$.

Последующие расчёты сводим в таблицу:

Параметр	Обозначение	Обоснование или формула	Значение	Ед. изм.
Средняя объёмная теплоёмкость продуктов сгорания в интервале температур $0-130^\circ\text{C}$	$c_{\text{г}}$	принимаем	1,37	$\text{кДж}/(\text{м}^3\text{K})$
Средняя объёмная теплоёмкость холодного воздуха в интервале температур $0-30^\circ\text{C}$	$c_{\text{в}}$	принимаем	1,32	$\text{кДж}/(\text{м}^3\text{K})$
Средняя объёмная теплоёмкость смеси уходящих газов с холодным воздухом в интервале температур $0-40^\circ\text{C}$	$c_{\text{см}}$	принимаем	1,34	$\text{кДж}/(\text{м}^3\text{K})$
Кратность рециркуляции	r	ф-ла (3.32)	0,07	

Вывод: при заданных режимах работы котлоагрегата степень рециркуляции равна 7%.

Пример 3.3. Определить геометрические характеристики каталитического реактора при горизонтальном расположении слоя катализатора и коаксиально-вертикальном расположении.

Исходные данные: котёл марки ДЕ-6,5-14, работающий на природном газе. Расход продуктов сгорания на выходе из котла (температура 326°C): $V_{yx} = 4,00 \text{ м}^3/\text{с}$. Объёмная скорость прокачивания продуктов сгорания через катализатор: $\omega_{об} = 30\,000 \text{ ч}^{-1}$. Коэффициент порозности: $\varepsilon = 0,3$.

Решение:

Объём катализатора рассчитывается по формуле:

$$V_{кат} = \frac{V_{yx}}{\varepsilon \cdot \omega_{об}}, \text{ м}^3 \quad (3.33)$$

где V_{yx} – расход продуктов сгорания на выходе из котла, $\text{м}^3/\text{с}$; $\omega_{об}$ – объёмная скорость прокачивания продуктов сгорания через катализатор, с^{-1} ; ε – коэффициент порозности (доля свободного объёма).

Площадь катализатора рассчитывается по формуле:

$$S_{кат} = V_{кат} / \omega_r, \text{ м}^2 \quad (3.34)$$

где ω_r – скорость продуктов сгорания при прохождении через катализатор при рабочих условиях, $\text{м}/\text{с}$ (должна быть в пределах от 0,1 до 1 $\text{м}/\text{с}$).

Параметр	Обозначение	Обоснование или формула	Значение	Ед. изм.
Объём катализатора	$V_{кат}$	ф-ла (3.33)	1,60	м^3
Скорость продуктов сгорания	ω_r	принимаем	0,80	$\text{м}/\text{с}$
Площадь катализатора	$S_{кат}$	ф-ла (3.34)	5,00	м^2
Геометрические характеристики реактора при горизонтальном расположении слоя				
Диаметр	D	$\sqrt{4 \cdot S_{кат} / \pi}$	2,5	м
Высота	h	$V_{кат} / S_{кат}$	0,32	м
Геометрические характеристики реактора при коаксиально-вертикальном расположении слоя				
Диаметр	D	принимаем меньше, чем для горизонтального	2,0	м
Толщина слоя	δ	принимаем	0,2	м
Диаметр внешнего слоя	d_1	$D - 0,8$	1,1	м
Диаметр внутреннего слоя	d_2	$D - 2 \cdot \delta - 0,8$	0,7	м
Высота	h	$4V_{кат} / [(d_1 - d_2) \cdot \pi]$	2,8	м

Характеристики каталитического реактора при горизонтальном расположении слоя и коаксиально-вертикальном расположении представлены на рис. 3.51.

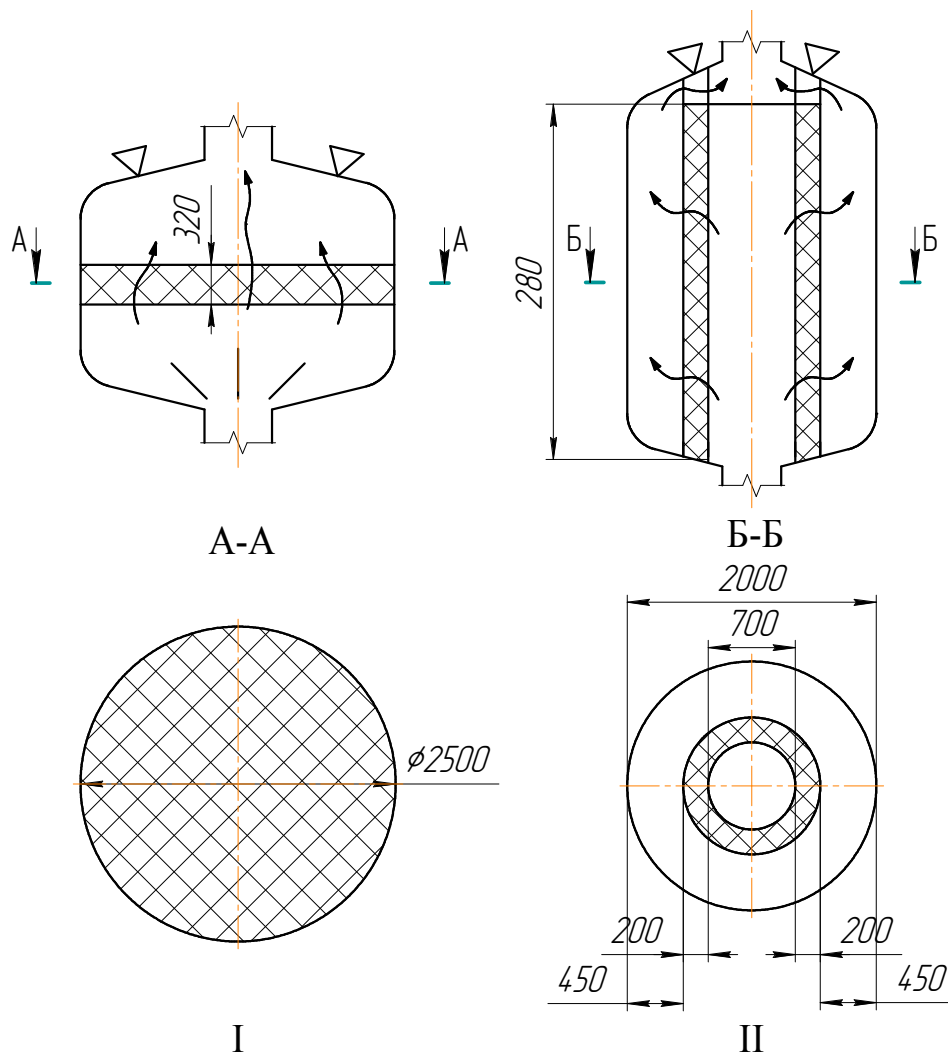


Рис. 3.51. Геометрические характеристики слоя катализатора: I – при горизонтальном расположении; II – при коаксиально-вертикальном расположении

Вывод: коаксиально-вертикальное расположение катализатора является более эффективным по сравнению с горизонтальным ввиду более длительного соприкосновения продуктов сгорания с восстановительным слоем, а также ввиду меньшего аэродинамического сопротивления.

Контрольные вопросы к 3-му разделу

1. Какие методы снижения загрязнения атмосферы называют технологическими?
2. Оцените потери теплоты с уходящими газами и от химической неполноты сгорания с экологических позиций.
3. Какие пути повышения эффективности сжигания органического топлива Вы знаете?
4. Какие виды энергосберегающего оборудования предпочтительно использовать в котельных установках и почему?
5. Назовите экологические преимущества установки энергосберегающего оборудования в котельной.
6. Почему методы рециркуляции, ступенчатого сжигания и ввода воды или пара в топочную камеру названы «технологическими»?
7. Каковы пути снижения выброса соединений углерода при сжигании различных топлив?
8. Что такое эколого-технологические режимные карты котлов?

9. Приведите графические зависимости образования токсичных веществ от тепловой нагрузки котлов и коэффициента избытка воздуха в топке.
10. Какие из горелочных устройств предназначены для снижения выброса оксидов азота?
11. С какой целью используются методы газификации и пиролиза мазута и твердого топлива?
12. Назовите способы снижения содержания сернистых соединений при сжигании серосодержащих топлив в топочной камере.
13. Как подразделяются методы восстановления оксидов азота?
14. Каковы преимущества использования селективных газообразных и жидких восстановителей?
15. Назовите преимущества и недостатки метода высокотемпературного обезвреживания продуктов сгорания от оксидов азота. Как можно устранить недостатки?
16. Каковы особенности метода каталитического восстановления оксидов азота? Назовите используемые катализаторы.
17. Как и с какой целью осуществляется термическое обезвреживание оксида углерода, сажи, бенз(а)пирена в выбросах промышленных котлов?
18. Какой положительный эффект получен при установке дожигательных устройств в котлах типа ДКВР?
19. Охарактеризуйте процессы адсорбции, абсорбции и хемосорбции. Какие из методов сорбционной очистки являются наиболее приемлемыми для обезвреживания продуктов сгорания топлива?
20. Приведите свойства сорбентов и конструкции аппаратов для осуществления абсорбционной очистки продуктов сгорания от сернистого ангидрида.
21. Сопоставьте различные конструкции сухих и мокрых золоуловителей по эффективности очистки.
22. Каковы различия в принципе действия промывных и жидкопленочных золоуловителей? Приведите примеры конструкций золоуловителей.
23. Что такое комплексные схемы очистки продуктов сгорания?
24. Проведите сопоставление комплексных схем №1 и №2. Какие блоки и почему входят в эти схемы?
25. Каковы особенности высокотемпературного восстановления оксидов азота в схеме №2? С какой целью в этой схеме устанавливается дожигательное устройство?
26. В чем отличие окислительно-абсорбционной комплексной схемы очистки (№4) от окислительно-хемосорбционной (№5)?
27. Какие сочетания экозащитного оборудования используются в комплексной схеме очистки от твердых частиц?
28. Какая технология очистки от сероводорода используется при обработке природного газа на месторождениях?
29. Каким образом снижают поступление в атмосферу продуктов неполного сгорания факелов на газоперерабатывающих комплексах?

4. ЗАЩИТА ВОЗДУШНОГО БАССЕЙНА ОТ ВРЕДНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ ВЫБРОСОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Наибольший выброс загрязняющих веществ в атмосферу создают технологические топливосжигающие установки и вентиляционные выбросы промышленных производств.

Состав как технологических, так и вентиляционных выбросов зависит от специфики технологических процессов, в том числе качества исходного сырья, объема выпускаемой продукции, количества технологических звеньев, в которых выделяются загрязнения.

4.1. Технологические методы снижения загрязнения атмосферы промышленными выбросами

Примерами технологических методов снижения загрязнения атмосферы в области *промышленных установок* являются:

- создание малоотходных или безотходных технологий, замкнутых технологических процессов;
- экономия технологического сырья;
- замена экологически опасного технологического сырья менее опасным;
- технологические приемы и оборудование для эффективного выведения и рассеивания вредных выбросов в атмосфере;
- сокращение удельного расхода топлива на единицу вырабатываемой технологической продукции.

Ниже приведен пример создания безотходной технологии получения окисленного битума на картонно-рубероидном заводе Н.Новгорода [41]. Завод расположен в экологически неблагоприятной зоне Заречной части города, а именно на Московском шоссе. Фоновые концентрации канцерогенного бенз(а)пирена (1 класс опасности) превышают санитарно-гигиенические нормативы. Источниками выброса БП являются одновременно: транспорт,двигающийся по шоссе; крупнейший автопарк города и технологические процессы производства битума на картонно-рубероидном заводе

Рассмотрим технологический процесс получения окисленного тугоплавкого битума, который наносится его на картонажное полотно для получения рубероида (рис. 4.1).

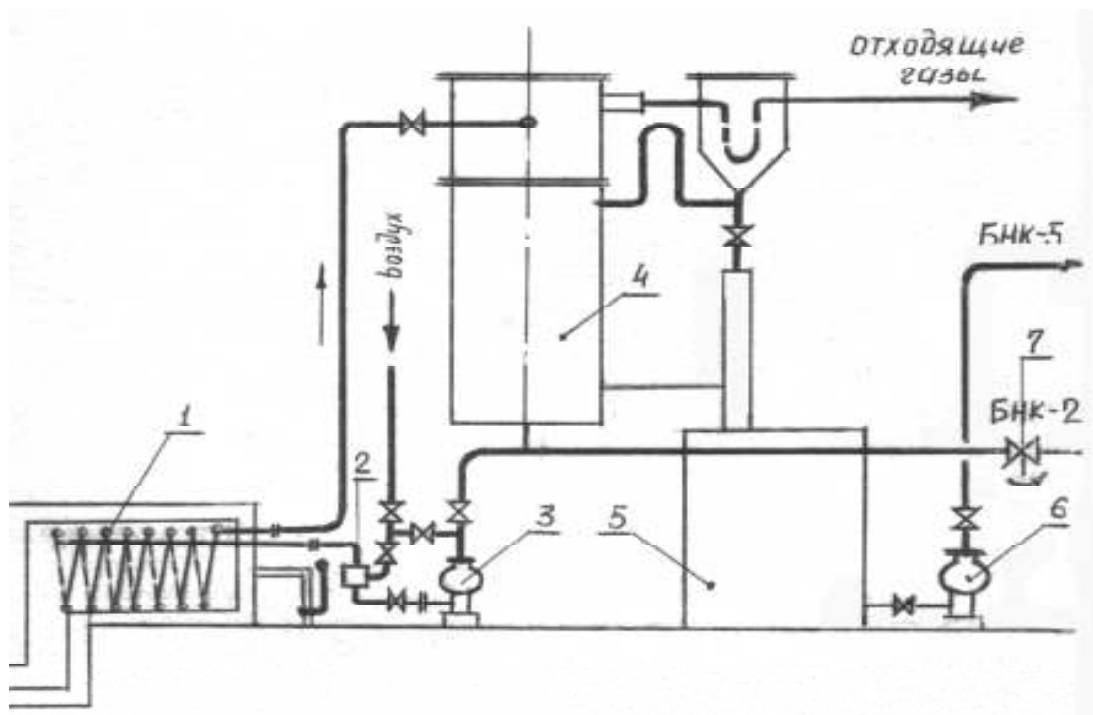


Рис. 4.1. Технологическая схема получения окисленного битума: 1 – реактор окисления битума; 2 – смеситель; 3 – циркуляционный насос; 4 – расширитель; 5 – бак окисленного битума; 6 – насос окисленного битума; 7 – дозатор исходного битума

Подогретый в технологической печи битум направляется на окисление в реактор 1. Продукты реакции разделяются в аппарате 4. Жидкий окисленный битум используют в технологии получения кровельного рубероида, а газообразные отходы выбрасывались ранее в атмосферу. Содержание БП в уходящих газах превышало $200 \text{ мкг}/100 \text{ м}^3$ (для сравнения ПДК бенз(а)пирена составляет $0,1 \text{ мкг}/100 \text{ м}^3$), то есть в 2000 раз превышало ПДК бенз(а)пирена в атмосферном воздухе.

Данную схему достаточно просто сделать безотходной. Для этого отходящие от реактора окисления токсичные горючие газы необходимо подать вместе с топливом на обезвреживание в технологическую печь для подогрева битума (рис. 4.2). Анализом установлено, что достигнуто полное обезвреживание выбросов от реакторов окисления (содержание БП в уходящих газах не превышало ПДК). Таким образом, за счет создания замкнутого технологического цикла (реактор для окисления битума – печь для нагрева битума) создана безотходная технология, сэкономлено топливо и защищен воздушный бассейн от загрязнения.

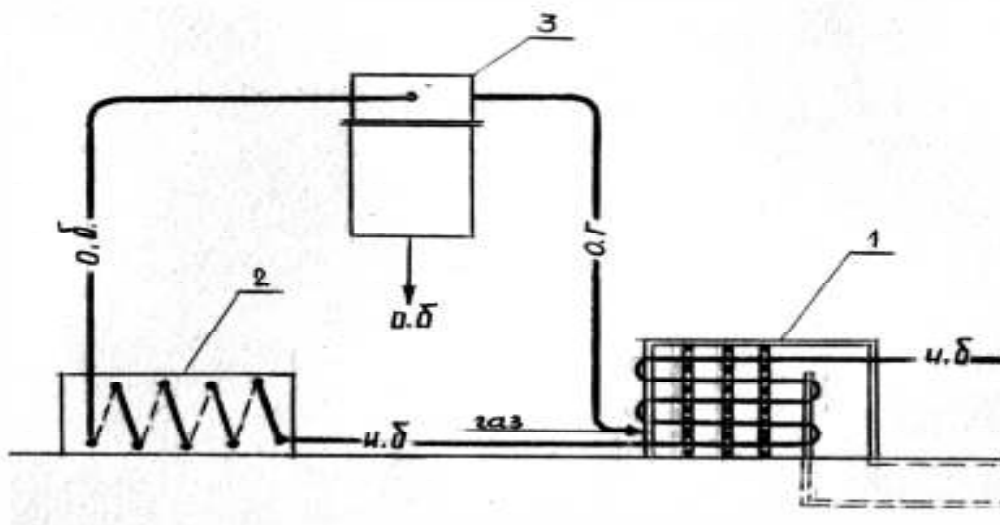


Рис. 4.2. Схема подачи выбросов реакторов окисления в топку нагревательной печи: 1 – печь для нагрева битума; 2 – реактор окисления битума; 3 – расширитель; и. б – исходный битум; о.б – окисленный битум; о.г – отходящие газы

Одним из эффективных технологических методов следует считать *замену экологоопасного технологического сырья менее опасным*. В качестве примера можно привести замену растворителя циклогексанона (2 класс опасности) в технологическом процессе нанесения покрытия на заводе искусственных кож в г. Богородске Нижегородской области. Выброс циклогексанона (ЦГ) был настолько велик, что резкий запах ЦГ ощущался в нескольких километрах от города. Замена растворителя на 2 класс опасности резко улучшила состояние воздушного бассейна в городе и окрестностях [41].

Следующим технологическим методом следует считать *снижение удельного расхода топлива на выработку единицы промышленной продукции*.

В настоящее время почти вся промышленная продукция России является слишком энергоемкой, что повышает её стоимость и затрудняет сбыт, особенно за рубежом. Причина заключается в том, что ввиду больших запасов топлива в стране создатели технологий не задумывались о его экономии. Тем более что стоимость топлива в СССР была просто мизерной. Постоянный рост стоимости современного топлива вынуждает технологов к снижению его затрат на единицу товарной продукции.

С экологических позиций этот метод явится *технологическим*, так как сжигание топлив резко повышает загрязнение воздушного бассейна токсичными продуктами сгорания – СО, сажей, БП, оксидами азота и серы.

4.2. Методы очистки технологических и вентиляционных выбросов в промышленности

В системах газоочистки от вредных паро-газообразных примесей получили наибольшее применение следующие способы:

- термические методы – огневое обезвреживание (дожигание) и гомогенное высокотемпературное восстановление; каталитическое окисление или восстановление;
- адсорбция – избирательное поглощение одного или нескольких компонентов из газовой смеси с помощью адсорбентов – твердых материалов с большой удельной поверхностью;
- абсорбция – избирательное поглощение одного или нескольких компонентов из газовой смеси жидкими поглотителями;
- фильтрационные методы – основаны на фильтрации газов с целью осаждения на фильтровальном материале парообразных загрязнителей.

4.2.1. Методы термического обезвреживания токсичных веществ

Методы термического обезвреживания вредных веществ можно разделить на *окислительные* (дожигание, катализ) и *восстановительные* (высокотемпературное восстановление, каталитическое восстановление).

Обезвреживание промышленных выбросов методом дожигания

Дожигание традиционно применяется для нейтрализации выбросов технологических процессов, в которых выделяются токсичные горючие вещества: альдегиды, спирты, растворители (бензол, толуол, ксилол и др.), пары битума, оксид углерода, углеводороды, сажа и др., а именно в химической, электротехнической, электронной, пищевой отраслях промышленности и при производстве лакокрасочных материалов и др.

Высокотемпературное окисление (дожигание) может осуществляться:

- в существующих топках котлов и печей;
- в специально установленных (автономных) топочных камерах.

Примечание: чаще используются автономные топочные камеры, но более перспективным является дожигание вредных веществ в существующих топках котлов и печей.

Автономные топочные камеры

Эффективность обезвреживания выбросов в дожигательных установках определяется свойствами токсичных веществ, подлежащих нейтрализации: температурой самовоспламенения обезвреживаемого вещества и временем пребывания его в необходимой температурной зоне [29, 41, 43].

Температуры самовоспламенения наиболее распространенных горючих загрязнителей отходящих газов промышленности приведены в табл. 4.1 [44].

Таблица 4.1

Температуры самовоспламенения $t, ^\circ\text{C}$ наиболее распространенных горючих загрязнителей отходящих газов промышленности

Вещество	$t, ^\circ\text{C}$	Вещество	$t, ^\circ\text{C}$	Вещество	$t, ^\circ\text{C}$
Аммиак	649	Метан	537	Фталевый ангидрид	584
Ацетон	538	Метиловый спирт	470	Фурфурол	393
Бензол	579	Метиловый эфир	350	Фурфуроловый спирт	490
Бутадиен	449	Метилэтилкетон	516	Хлорбензол	674
Винилацетат	426	Олеиновая кислота	363	Циклогексанон	495
Глицерин	393	Пропилен	504	Этан	510
Дихлорметан	640	Скипидар	253	Этилбензол	466
Дихлорэтилен	413	Стирол	491	Этилена оксид	430
Керосин	264	Толуол	552	Этиленгликоль	413
Крезол	869	Углерода оксид	652	Этиловый спирт	426
Ксилол	496	Фенол	715	Этиловый эфир	186

Дожигание заключается в нагреве выбросов до температур, превышающих температуры воспламенения токсичных компонентов, и выдержке их при этих температурах в присутствии кислорода.

Температура в зоне обезвреживания токсичных горючих веществ должна превышать температуру их воспламенения в 1,5 – 2 раза с целью надежного дожигания вредных ингредиентов смеси, подаваемой на нейтрализацию, но быть не менее $750 ^\circ\text{C}$.

Дожигание может осуществляться путем подачи обезвреживаемой смеси:

- в факел сжигаемого топлива (так называемое огневое обезвреживание),

где устанавливается температурный интервал 1500-1800°C;

– непосредственно в камеру сжигания (топочную камеру), т.е. в зону температур 1300-1100°C.

Конструкция установки дожигания должна обеспечить нейтрализацию токсичного продукта. Горючие примеси с теплотой сгорания более 3500 кДж/м³ при их значительном содержании в очищаемом газе могут использоваться в качестве топлива. Однако в большинстве случаев приходится затрачивать дополнительно топливо (рис. 4.5а), чаще всего – природный газ для создания необходимой температуры обезвреживания. Чтобы снизить расход сжигаемого топлива (см. расчет автономной камеры), используют устройства для утилизации теплоты, например установку теплообменника для подогрева подаваемой смеси (рис. 4.3 (б))

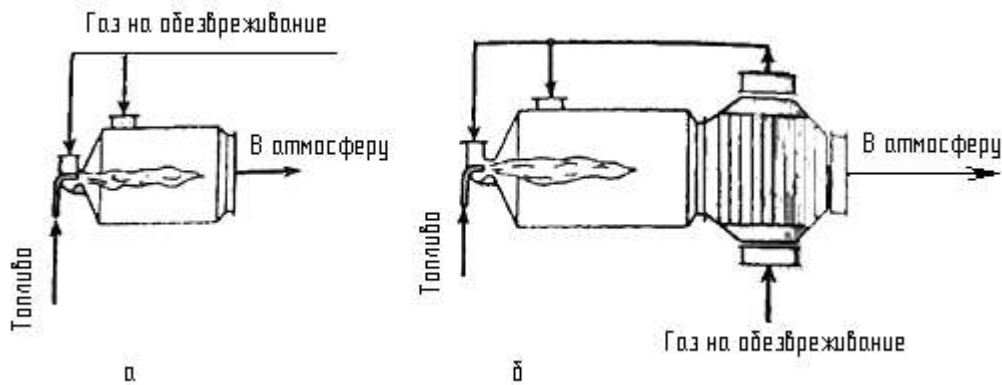


Рис. 4.3. Схемы термических нейтрализаторов промышленных отходящих газов: а – без теплообменника; б – с теплообменником

Температуру обезвреживания выбросов можно снизить, а полноту очистки увеличить, если топочную камеру оснастить специальными *дожигательными устройствами*. Это особенно важно при обезвреживании технологических выбросов, имеющих нестабильный состав во времени, особенно содержание горючих веществ. В этом случае дожигательные устройства будут служить надежным аккумулятором и запальником для горючей смеси.

На рис. 4.4 показана автономная топочная камера для дожигания водородсодержащих газов, оснащенная дожигательным устройством в виде

нескольких рядов дожигательных решеток [41]. Отбросные газы способны гореть самостоятельно, но их состав колеблется во времени.

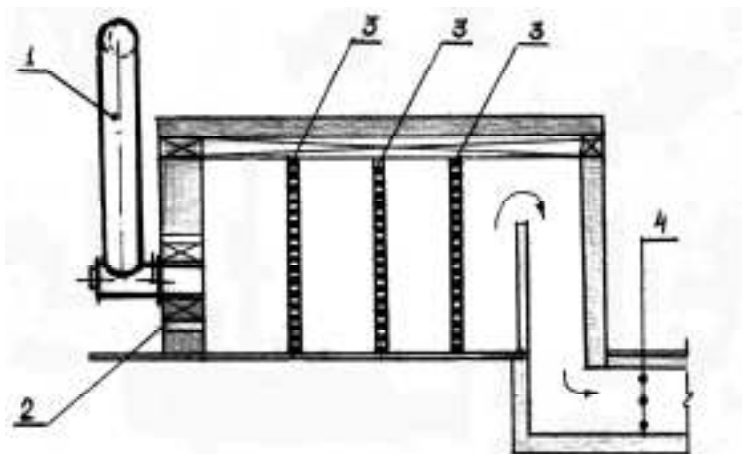


Рис. 4.4. Топочная камера с дожигательными решетками: 1 – вход обезвреживаемой смеси, содержащей токсичные горючие вещества; 2 – подсос воздуха для горения; 3 – дожигательные решетки; 4 – устройство для отбора проб

Необходимое время пребывания токсичной примеси в зоне высоких температур должно находиться в пределах $(0,1 \div 1,0)$ с. Время пребывания обезвреживаемой смеси в камере термического обезвреживания можно увеличить за счет установки специальных перегородок на пути движения продуктов сгорания, аналогично промышленным котлам.

В зависимости от содержания горючих токсичных веществ в промышленных выбросах, обезвреживание может происходить следующим образом:

- большие концентрации токсичных веществ, когда достигается автотермичность горения примесей (генераторный газ, водяной газ и др.) – использование в качестве топлива;
- значительное содержание токсичных веществ, но не достигается автотермичность горения – замена части топлива горючими веществами выбросов;
- незначительное содержание горючих веществ, например, вентиляционные выбросы, при содержании в выбросах кислорода не менее 18% - подача в качестве дутьевого воздуха в топку существующих котлов и печей (рис.3.5).

По расположению топочные камеры можно разделить на горизонтальные и вертикальные. Вертикальные печи занимают меньше места в плане помещения, а горизонтальные удобнее с позиции обслуживания, наблюдения за работой и отбора проб для анализа газов.

Принципиальные схемы ввода отбросных газов в топочные устройства в зависимости от содержания в них кислорода:

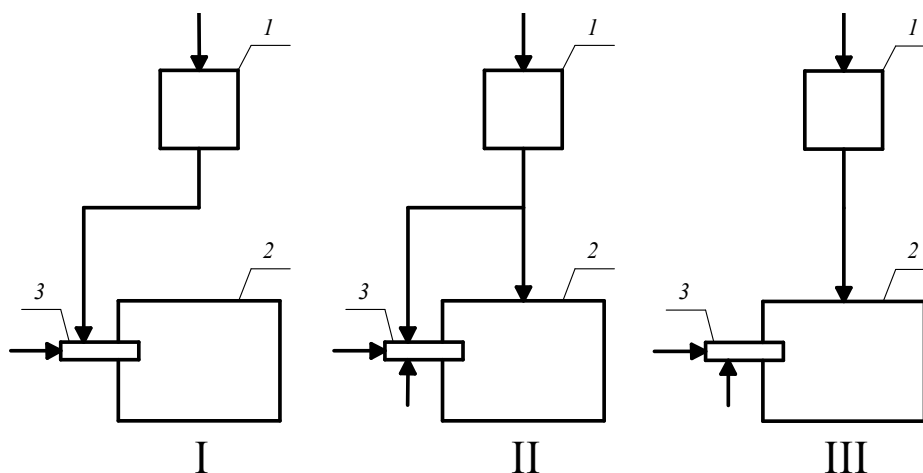


Рис. 4.5. Схемы ввода отбросных газов в топочные устройства:
 I – Концентрация O_2 более 17%; II – Концентрация O_2 (5-17)%; III – Концентрация O_2 менее 5%; 1 – источник отбросных газов; 2 – топочное устройство; 3 – горелочное устройство

По способу ввода обезвреживаемых газов топочные камеры можно разделить на прямоточные и циклонные. В циклонных топках выбросы вводятся тангенциально, что улучшает условия перемешивания продуктов сгорания топлива с выбросами.

Преимущества метода термического обезвреживания (дожигания) в автономной топке:

- можно добиться практически полного устранения вредных примесей (при соблюдении указанных ранее условий) – см. табл. 4.2 [29].

Таблица 4.2

Эффективность обезвреживания газов окисления в печах дожигания на установках по производству битума Рязанского НПЗ

Печь	Поступило, кг/ч			Выброшено в атмосферу, кг/ч					Степень очистки, %			
	H_2S	$C_m H_n$	CO	H_2S	SO_2	$C_m H_n$	CO	NO_2	H_2S	$C_m H_n$	CO	η
П-1	4,72	933,86	43,72	н/обн.	8,87	0,081	0,056	1,129	100	99,99	99,87	96.15
П-2	6,15	1356,7	62,52	-	12,69	0,009	0,426	1,56	100	99.9	99,86	96.13

- малое аэродинамическое сопротивление установки;

- простота аппаратного исполнения (отсутствие дорогостоящего катализатора);

- возможность обезвреживать выбросы, содержащие смолистые вещества (катализатор забивается и резко снижается способность к обезвреживанию).

Недостаток метода дожигания – большой расход топлива из-за более высоких температур в зоне обезвреживания примесей.

Дожигательные устройства на газоходах

Кроме того, возможно выполнение дожигательных устройств на существующих газоходах топливосжигающих установок. Это особенно касается высокотемпературных печей безокислительного нагрева и др. печей, когда технологический процесс предполагает неполное сгорание в основном объеме печи (см. очистка ваграночных газов далее).

Дожигатель на газоходе может собой представлять либо специальную камеру с подводом воздуха (если его недостаточно для дожигания) и горелочным устройством, либо состоять из блоков, заполненных засыпкой из керамических элементов (рис. 4.6). Засыпка ограничена сеткой из легированных сталей.

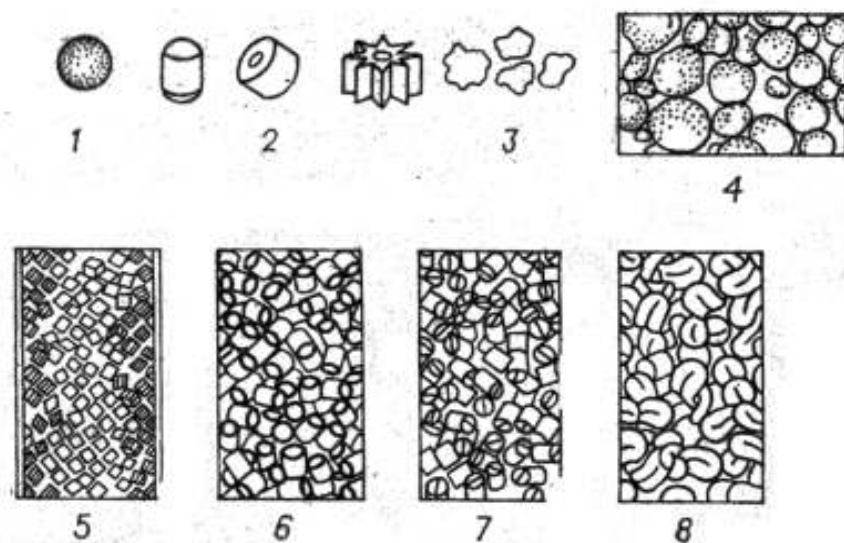


Рис. 4.6. Элементы зернистого слоя: шар, цилиндр, кольца Рашига, Лессига, звездочки

Дожигание ваграночных газов наиболее легко обеспечить ниже колошникового (загрузочного) окна. Отобранные газы смешиваются в специальных турбулентных горелках с воздухом и дожигаются в закрытых топках, предварительно разогретых до температуры $\sim 800^{\circ}\text{C}$ за счёт сжигания природного газа или мазута в качестве топлива.

Воспламенение газозвушной смеси, подаваемой горелкой в вагранку,

происходит от пламени ваграночных газов или специального запальника. Назначение горелки – поддерживать в шахте вагранки постоянный факел пламени, в котором дожигается СО. Система дожигания позволяет снизить содержание оксида углерода в ваграночных газах с 12 – 14 до 1,0 – 1,5%.

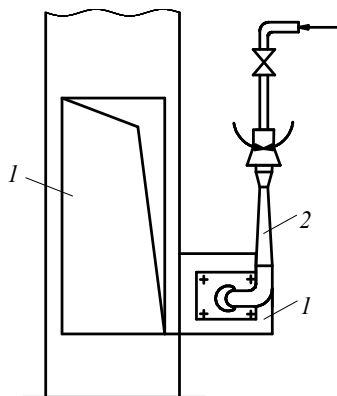


Рис. 4.7. Система дожигания газов на вагранках 1 – коробка; 2 – инжекционная горелка; 3 – завалочное окно

Наиболее простой вариант дожигания, применимый к открытым вагранкам [32], может осуществляться следующим образом (рис. 4.7). Узел дожигания располагается рядом с завалочным окном.

Он представляет собой коробку, в которой смонтирована инжекционная горелка производительностью 25 м³/ч.

Использование топочных камер котлов в качестве инсenerаторов

Наименее затратным является метод термического обезвреживания токсичных промышленных выбросов, содержащих токсичные горючие компоненты, в существующих топках котлов и печей.

Схема дожигания вредных выбросов от пропиточных агрегатов картонно-рубероидного цеха в существующих топочных камерах котельной установки представлена на рис.4.8.

Это самый малозатратный метод, так как выбросы подаются в существующие топочные камеры, то есть отпадает необходимость в дополнительном расходе топлива для обезвреживания токсичных веществ. Более того, горючие вещества вносят при сгорании некоторую долю теплоты (в зависимости от теплоты сгорания примесей и температуры выбросов), следовательно, снижается расход основного топлива.

Однако перед использованием способа следует убедиться в возможности его применения, а для этого:

- сопоставить режимы работы технологического оборудования,

выделяющего токсичные вещества с режимами работы существующих котлов или печей, в которые подаются выбросы с целью дожигания;

- сопоставить расход выбросов ($V_{выбр.}$) с потребностью в дутьевом воздухе ($V_{дуть.}$) в тех случаях, когда выбросы подаются в качестве дутьевого воздуха для топливосжигающего оборудования;

- убедиться, что подача выбросов не внесет негативных изменений в процесс горения основного топлива и работу поверхностей нагрева.

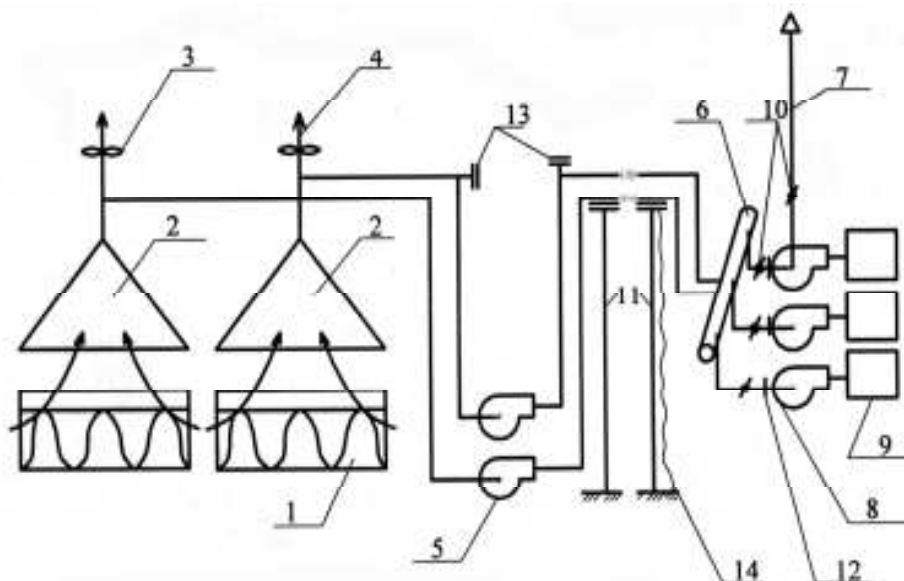


Рис. 4.8. Схема термического обезвреживания вентиляционных выбросов в топках котлов: 1 – технологическое оборудование; 2 – местный отсос; 3 – существующий вентилятор (осевой); 4 – существующий выброс в атмосферу; 5 – технологический вентилятор, транспортирующий выброс в котельную; 6 – сборный коллектор (в непосредственной близости от котельной); 7 – воздухозаборная шахта; 8 – дутьевой вентилятор; 9 – топочная камера; 10 – система шиберов; 11 – опора; 12 – огнепреградители; 13 – взрывные клапаны; 14 – заземление

Таким образом, сначала анализируем величины ($V_{выбр.}$) и ($V_{дуть.}$).

Если расход выбросов не превышает потребности в дутьевом воздухе ($V_{выбр.} \leq V_{дуть.}$) даже при минимальной нагрузке котельной (или печного отделения), то это количество выбросов может быть подано на обезвреживание.

Примечание: При этом нужно ещё убедиться, что сами примеси не окажут негативного воздействия на оборудование или аппаратуру котла (или печи). Например, если в обезвреживаемых газах содержатся смолистые вещества или твердые частицы, то необходима предочистка.

В тех случаях, когда расход выбросов превышает потребность в дутьевом воздухе ($V_{выбр.} > V_{дуть.}$), возможны следующие варианты:

- герметизация технологического оборудования, выделяющего вредные вещества, с целью снижения расхода выбросов;

- подача одной части выбросов в дутьевой тракт, а другой непосредственно в топочную камеру во избежание отрыва факела; при этом коэффициент избытка воздуха не должен превышать $\alpha=1,8$. Дальнейшее разбавление газов вызовет резкое снижение температуры в топке и нарушит работу котла. Меньшее разбавление продуктов сгорания в топке ($\alpha=1,3-1,4$) не приведет к погасанию факела, но увеличит потери с уходящими газами и аэродинамическое сопротивление котла.

Во всех этих случаях необходимо выполнять поверочный тепловой расчет работы котла в новых условиях и только на основании результатов расчета делать вывод о подаче определенного расхода выбросов на дожигание.

Особое внимание при подаче выбросов в существующие топливосжигающие устройства необходимо уделить их *безопасной транспортировке*. С позиции техники безопасности трасса воздухопроводов должна быть оснащена:

- огнепреградителями;
- взрывными клапанами для предотвращения разрушения воздухопроводов;
- заземлением во избежание накопления статического заряда;
- конденсатосборниками в местах возможного скопления конденсирующихся примесей.

Использование регенеративных аппаратов термического обезвреживания

В тех случаях, когда на данном предприятии отсутствует возможность дожигания вредных выбросов в существующих топках котлов и печей, наиболее перспективно использование *регенеративных* аппаратов термического обезвреживания.

Процесс обезвреживания вредных веществ происходит в этих аппаратах с максимальной эффективностью при низких удельных расходах топлива, что достигается за счет высокой степени регенерации тепла в теплоаккумулирующих насадках с большой поверхностью теплообмена.

В качестве примера можно привести регенеративную термическую установку очистки выбросов окрасочного производства (паров растворителей) грузовых и легковых автомобилей ОАО «ГАЗ» (рис. 4.9).

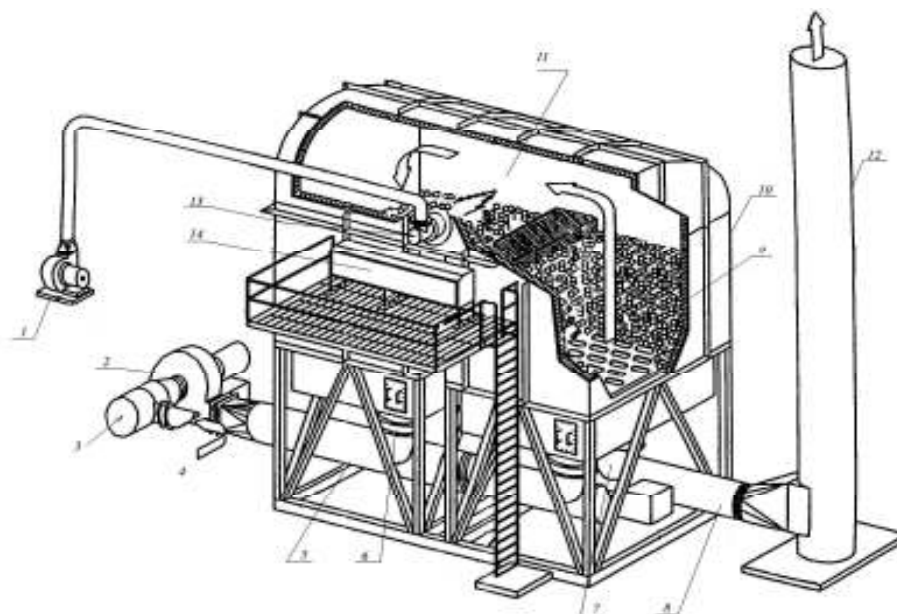


Рис. 4.9. Схема регенеративной термической установки: 1 – дутьевой вентилятор; 2 – вентилятор принудительной тяги; 3 – подача загрязненного воздуха; 4 – подача свежего воздуха; 5 – входной канал; 6 – входной дампер; 7 – выходной дампер; 8 – выходной канал; 9 – керамическая насадка; 10 – теплообменные канистры; 11 – камера сгорания; 12 – вытяжная труба; 13 – горелка; 14 – узел газовой линии и панель управления

Загрязненный воздух из сушильных камер окрасочного производства перед попаданием в камеру сгорания проходит через керамические насадки с целью предварительного нагрева. Далее газовая смесь попадает в камеру сгорания и догревается горелкой, работающей на природном газе, до температуры 815°C . Это приводит к разрушению и дожиганию паров растворителя, содержащихся в загрязненном воздухе.

После камеры сгорания воздушный поток направляется вниз и проходит через керамическую среду, нагревая ее для следующего цикла работы. После этого газо-воздушная смесь выбрасывается в атмосферу. Автоматически работающие заслонки направляют поток воздуха попеременно через каждую емкость с керамической средой. Поток воздуха меняют направление через каждые 90 секунд.

Каталитическое окисление

Каталитическое окисление осуществляется с участием катализатора, снижающего температурный барьер реакции, т. е. проходит при более низких температурах процесса нейтрализации, зависящих от характеристик катализатора.

По материалу окислительные катализаторы разделяются на металлические, оксидные и смешанные. Основной характеристикой катализатора является температура, при которой катализатор эффективно окисляет вредные вещества.

Используемыми катализаторами являются в большинстве случаев металлы или их соединения (платина и металлы платинового ряда, оксид меди, диоксид марганца и т.п.). Так, Дзержинским филиалом НИИОгаз (Т. Г. Аланова, Т. Я. Михеева и др.), разработаны катализаторы, состоящие из платины и палладия или смеси благородных металлов с добавкой платины и палладия (сотые доли процента к массе катализатора). Они наносятся в виде активной пленки на нихромовую проволоку диаметром $(0,4 \div 0,5)$ мм, свитую в спираль диаметром 5 мм. Катализаторы могут также изготавливаться в форме шаров, колец, цилиндров, червячков и др.

Металлические катализаторы имеют меньшую *эффективную температуру*, чем смешанные и оксидные. Самый низкий температурный уровень «срабатывания» - $(200-250)^\circ\text{C}$ - имеют металлические катализаторы на основе драгоценных металлов: платины и палладия. Более высокие температуры эффективной работы - $(250-400)^\circ\text{C}$ имеют остальные металлы: медь, никель, кобальт, хром, железо и др.

Оксидные катализаторы представлены оксидами железа, меди, никеля, кобальта и др. металлов и их смесями.

Смешанные катализаторы – это металлы, перечисленные ранее, нанесенные на носитель из оксидного катализатора.

Следующей характеристикой катализаторов является *объемная скорость прокачивания* через катализатор, ч^{-1} . Она означает часовой расход прокачиваемых газов на 1 м^3 катализатора.

Преимущества металлических катализаторов:

- более низкая температура эффективной работы по сравнению с оксидными и смешанными. Особые преимущества имеют катализаторы на основе драгоценных металлов. Кроме наименьшей эффективной температуры, они обладают высокой стабильностью во времени (катализаторы из остальных перечисленных металлов теряют каталитическую активность в процессе работы, то есть нестабильны во времени);

- более высокая объемная скорость прокачивания обезвреживаемой смеси через катализатор (особенно катализаторы из драгметаллов).

Основные *недостатки* всех *металлических* катализаторов: имеют высокую стоимость, особенно платиновые; легко отравляются мышьяком, свинцом и др.; отравляются сернистыми соединениями; теряют активность при прокачивании кислородсодержащих газов; не выдерживают перегрева; нестабильны во времени (кроме драгметаллов).

Преимущества оксидных катализаторов: имеют меньшую стоимость по сравнению с металлическими; не отравляются сернистыми соединениями; не теряют активность при прокачивании кислородсодержащих смесей (так как сами содержат кислород); не боятся перегрева.

К *недостаткам оксидных* катализаторов можно отнести: более высокую температуру эффективной работы - 400-600°C; меньшую объемную скорость прокачивания (большой необходимый объем оксидного катализатора по сравнению с металлическим).

Смешанные катализаторы соединяют в себе преимущества и недостатки металлических катализаторов.

Каталитическое окисление беспламенно и потому не зависит от температуры воспламенения смеси, а зависит от характеристик используемого катализатора. Кинетику гетерогенного окисления можно представить в виде следующих элементарных стадий: диффузия исходных веществ к поверхности катализатора, адсорбция, химическая реакция, десорбция и диффузия полученных веществ в свободное газовое пространство.

Преобладание диффузионных стадий процесса обуславливает малые линейные скорости прокачивания обезвреживаемой смеси и, как следствие, приводит к громоздкости установки особенно при каталитическом реакторе с горизонтальным слоем катализатора.

Отсюда следующие перспективные направления развития конструкций каталитических реакторов и катализаторов:

- замена горизонтального слоя катализатора на вертикальный с коаксиальным размещением каталитических элементов;
- разработка новых катализаторов с высокой объемной скоростью процесса;
- снижение аэродинамического сопротивления каталитического реактора в результате его конструктивных изменений.

Динамика конструктивных изменений каталитических реакторов представлена на рис. 4.10.

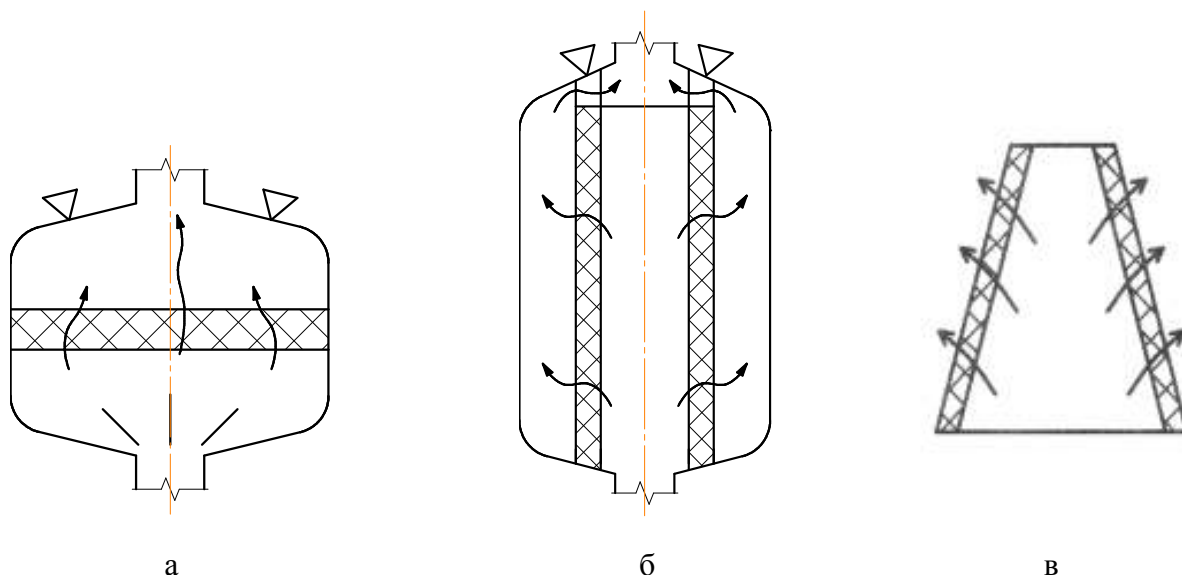


Рис. 4.10. Динамика конструкций каталитических реакторов: а – горизонтальный слой, б – вертикальный коаксиальный слой; в – слой наклонный коаксиальный

Для очистки вентиляционных выбросов в институте катализа им. Г.М.Борескова Сибирского отделения Российской Академии Наук (ИК СО РАН)

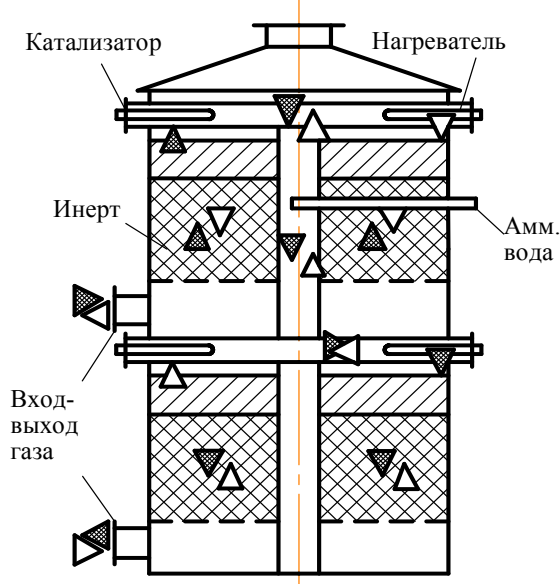


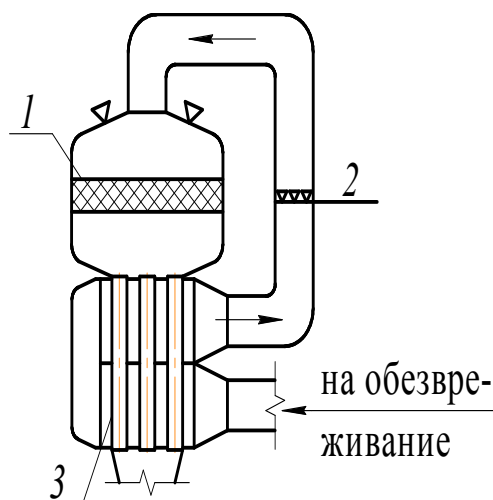
Рис. 4.11. Реактор каталитического окисления ИК СО РАН

был разработан Реверс-процесс для каталитической очистки слабоконцентрированных газовых выбросов на оксидных катализаторах. Этот высокоэффективный способ позволяет очищать отходящие газы ряда веществ (оксидов азота, аммиака, диоксида серы, органических веществ. Реактор для каталитической очистки см. рис. 4.11. Описание процесса очистки см. раздел 3.2.2.

Термокаталитическое окисление

Если температура обезвреживаемых выбросов ниже, чем эффективная температура каталитического процесса, то необходим предварительный подогрев подаваемой на обезвреживание смеси. Подогрев осуществляется в основном двумя способами: за счет газогорелочного устройства или путем прокачивания через теплообменник-утилизатор.

Рис. 4.12. Термокаталитический реактор института Газа Украины: 1 – каталитический реактор; 2 – горелочное устройство; 3 – теплообменник



На рис. 4.13 представлен термокаталитический реактор полусовмещенного типа, разработанный Дзержинским филиалом НИИОГаз. Преимущества данной системы очистки в следующем:

- слоевой реактор заменен на коаксиальный;
- каталитический реактор и топочная камера объединены в единой обмуровке;
- на входе в каталитический реактор размещено устройство для эффективного перемешивания обезвреживаемых газов с топочными.

На рис. 4.14 изображен термокаталитический реактор совмещенного типа, разработанный также в Дзержинском филиале НИИОГаз. Он отличается от предыдущей конструкции наличием встроенного теплообменника для нагрева выбросов перед поступлением в топочную камеру. Это наиболее совершенная система каталитической очистки выбросов, содержащих токсичные горючие вещества.

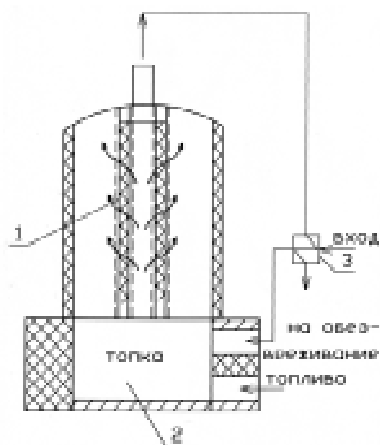


Рис. 4.13. Полусовмещенная система: 1 – каталитический реактор; 2 – топочная камера; 3 – теплообменник

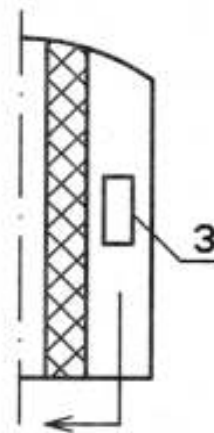


Рис. 4.14. Совмещенная система: 1 – каталитический реактор; 2 – топочная камера; 3 – теплообменник

На рис. 4.15 представлена схема термokatалитической очистки выбросов сушильных печей линий лакирования, содержащих этилцеллозоль, этанол, ксилол и др., включающая термokatалитический реактор с вертикальным коаксиальным слоем.

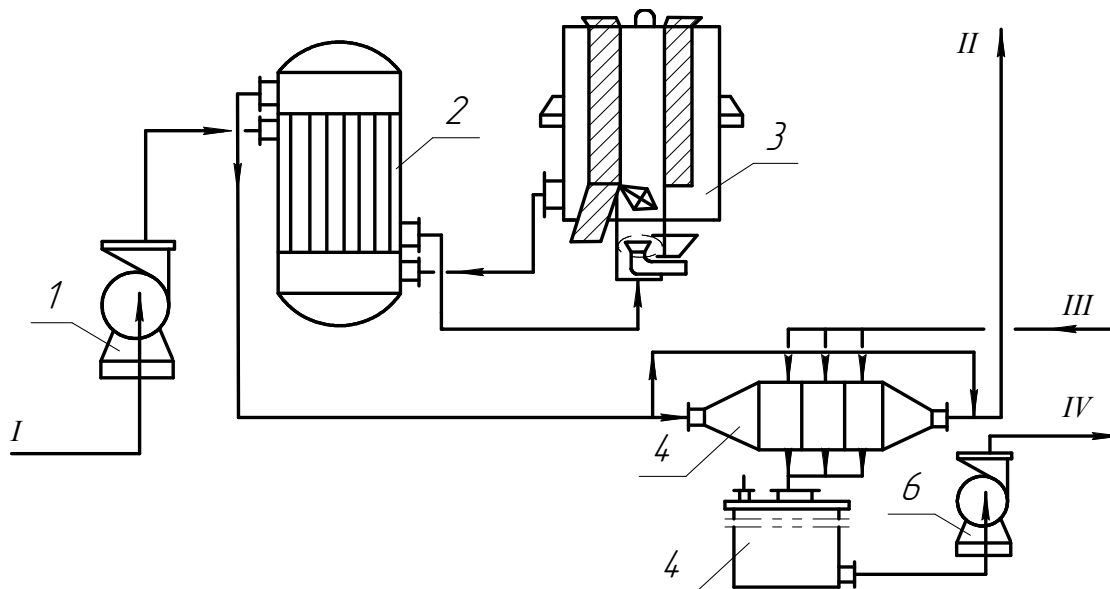


Рис. 4.15. Схема установки очистки газовых выбросов линий лакирования:
 I – газовые выбросы; II – очищенный воздух в атмосферу; III – вода избыточным давлением 2 кгс/см², температурой 10°C; IV – вода на бытовые нужды избыточным давлением 5 кгс/см², температурой 60-65°C. 1 – центробежный вентилятор В-Ц6-30; 2 – теплообменник; 3 – реактор ТКР-50-24-3,6; 4 – калорифер; 5 – ёмкость; 6 – центробежный насос 3Х-6/54-А1

Процесс очистки осуществляется при температуре 320-450°C, объёмной скорости 16 700 ч⁻¹ в термokatалитическом реакторе после предварительного подогрева газовой смеси в теплообменнике за счёт рекуперации части тепла очищенных газов и дополнительного подвода теплоты горелкой.

Восстановительный катализ

В нашей стране в последние годы значительное внимание уделяется разработке новых методов и отечественных катализаторов для процессов селективного каталитического восстановления.

Наиболее эффективными являются блочные катализаторы сотовой структуры. На базе этих катализаторов в Башкортостане разработана технология и спроектирован опытно-промышленный блок по селективной очистке дымовых газов технологической печи нефтеперерабатывающего завода. Результаты опытно-промышленных исследований по очистке дымовых газов от

оксидов азота с применением аммиачной воды, содержащей поверхностно активные вещества (ПАВ), приведены в табл. 4.3.

Таблица 4.3

Характеристика установки селективной каталитической очистки

Мольное соотношение NH_3/NO_x	Концентрация ПАВ и аммиачной воды, % по массе	Степень очистки от NO_x , %	Проскок NH_3 $\text{см}^3/\text{м}^3$
0,8	–	68	12
0,9	–	74	14
1	–	80	21
0,8	0,5	76	5
1	0,5	93	6

Степень очистки дымовых газов от оксидов азота возрастает с увеличением соотношения NH_3/NO_x с 0,8 до 1 и достигает 80%, но при этом возрастает проскок аммиака в дымовых газах.

В Нижнем Новгороде технология СКВ ДЕНОКС впервые была смонтирована в 2002 году на АООТ “РУМО” для снижения NO_x продуктов сгорания от стендов испытания двигателей, работающих на дизельном топливе. Схема очистки была приведена в разделе 3.2.2.

Испытание каталитической установки на АООТ “РУМО” показали, что на всех нагрузках двигателей достигнута высокая степень обезвреживания оксидов азота (степень очистки дымовых газов от NO_x составила $> 90\%$).

Основной недостаток метода – высокие капитальные затраты, связанные с тем, что в качестве катализаторов используются дорогостоящие оксид титана и пентоксид ванадия. Под воздействием SO_3 происходит отравление катализатора, поэтому срок его службы не превышает, как правило, 1–3 года.

Проблему отравления катализатора серным ангидридом пытаются решить применением сложного катализатора. Большое значение имеет конструкция собственно решетки катализатора: она должна обеспечить свободный проход газа с малым сопротивлением, при этом не должны создаваться условия для отравления золы. Важное значение имеет объём катализатора, а также удобство его замены.

Наиболее распространены катализаторы сотовой конструкции, позволяющие разместить большую поверхность в единице объёма. На рис. 4.16 представлена совместная разработка ООО “ВНИИГАЗ” и РГУНГ им. И.М. Губкина.

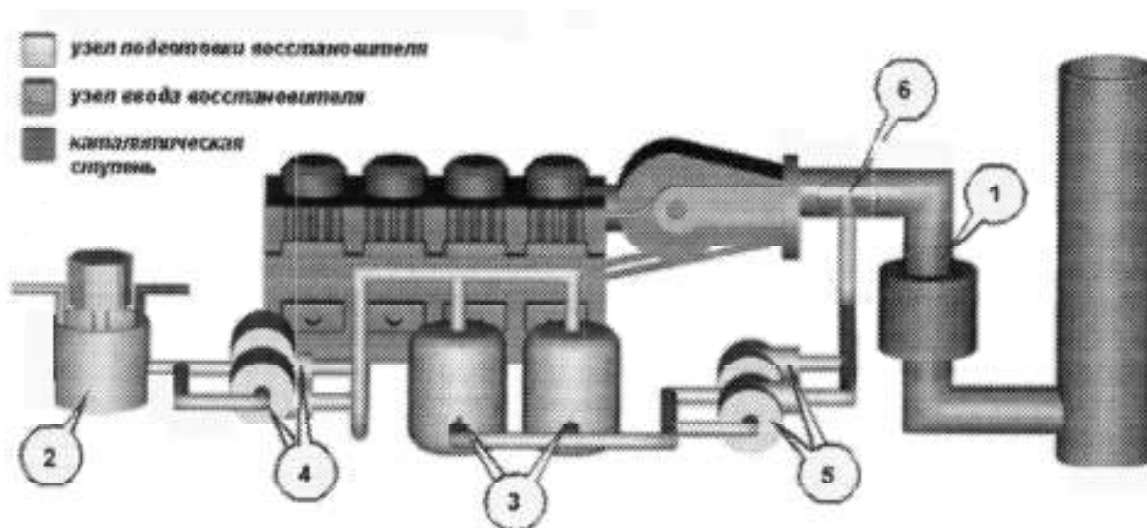


Рис. 4.16. Установки очистки от оксидов азота: 1 – каталитический реактор; 2 – ёмкость приготовления; 3 – рабочие емкости восстановителя; 4 – центробежные насосы; 5 – насосы–дозаторы; 6 – форсунка

Установка предназначена для сокращения выбросов оксидов азота в атмосферу с отходящими газами агрегатов, использующих углеводородное топливо. Установка разработана на базе процесса очистки промышленных газов от NO_x гомогенно–гетерогенным восстановлением аминсодержащими восстановителями.

Таблица 4.4

Технологические параметры и характеристик технологического оборудования

Мощность установки, кВт	1100
Нормальный объем очищаемых газов, м ³ /ч	12000
Содержание оксидов азота в очищаемых газах, мг/м ³	1800
Степень очистки, %	90–99
Расход раствора восстановителя, л/ч	55
Объем катализатора, куб.м	1,0
Реактор каталитический: – габаритные размеры, м	диаметр 2,0
– масса, кг	2000
Приемная емкость: – габаритные размеры, м	4,0×2,5×1
– масса, кг	1300
Расходная емкость: – габаритные размеры, м	диаметр 1,2×1,6
Электронасосы:	
– подача, л/ч	63
– мощность, кВт	0,37
Насосы–дозаторы:	
– подача, л/ч	6,3
– мощность, кВт	3,0

Установка может быть модифицирована практически для любого промышленного теплового агрегата, использующего органическое топливо.

Управление расходом подачи аммиачной воды осуществляется компьютером в зависимости от сигнала по нагрузке (обычно на основании данных по расходу топлива) и концентрации NO_x в продуктах сгорания.

4.2.2. Сорбционная очистка

Адсорбционный метод основан на физических свойствах некоторых твердых тел с ультрамикроскопической структурой, называемых адсорбентами, выборочно извлекать отдельные компоненты из газовой смеси и удерживать их на своей поверхности [29].

Концентрация вещества, которую может уловить адсорбент, зависит от его количества у поверхности, площади поверхности, физических, химических и электрических свойств адсорбируемого вещества и адсорбента, температурных условий. Адсорбент должен иметь высокую сорбционную ёмкость, которая в свою очередь зависит от удельной площади поверхности и физико-химических свойств поверхностных частиц.

Адсорбент удерживает молекулы газов на внешней поверхности и внутри пор. Внешняя поверхность адсорбента в зависимости от размеров и формы: гранулы, таблетки, шарики и т.д. может составлять 10^3 – 10^4 $\text{м}^2/\text{м}^3$. Поверхность внутренних пор значительна более развита. Обычно различают поры мелкие (микропоры) со средним диаметром до 30×10^{-10} м, средних размеров (мезопоры) диаметром $(30-3000)10^{-10}$ м и крупные (макропоры) диаметром более $(3000-4000)10^{-10}$ м. Считается, что микропоры заполняются улавливаемым веществом (адсорбатом) по всему объему, а мезо- и макропоры - только в несколько слоев на поверхности. Ориентировочно поверхность микропор может достигать $(100-500)10^6$ $\text{м}^2/\text{м}^3$, мезопор $(10-200) 10^6$ $\text{м}^2/\text{м}^3$, макропор - $(1-10) 10^6$ $\text{м}^2/\text{м}^3$.

Кроме того, сорбент должен обладать достаточной механической прочностью и малым аэродинамическим сопротивлением. С целью снижения аэродинамического сопротивления используют сорбенты с небольшой плотностью, обтекаемой формой частиц и высокой порозностью засыпки.

Адсорбент для процесса физической сорбции должен быть химически пассивным к улавливаемым компонентам, а для химической сорбции (хемосорбции) – вступать с молекулами загрязнителей в химические реакции.

Основные твердые сорбенты: активированные угли, силикагель, алю-

могель, алюмосиликат, цеолиты. Применяется также ряд природных сорбентов: торф, лигнин, фосфатное сырье, бурые угли. Ниже, в табл. 4.5 и табл. 4.6 приведены свойства наиболее распространенных адсорбентов [29].

Таблица 4.5

Характеристика активированных углей

Марка адсорбента	Насыпная плотность, кг/м ³	Размер основной фракции, мм	Объем пор, 10 ³ м ³ /кг			Область применения
			мелких (микро)	средних (мезо)	крупных (макро)	
АР-Т	550...600	1...6	0,33	-	-	Рекуперация паров
АР-А	550	2,8...5	0,384	0,064	0,382	
АР-Б	580	"	0,31	0,038	0,32	
АР-В	600	"	0,24	0,023	0,19	
АР-З	550	1...5,5	0,33	0,07	0,30	
АГ-3	400...500	1,5...2,8	0,32...0,42	0,12...0,16	0,41...0,52	Адсорбция газов
АГ-5	450	1...1,5	0,30	-	-	
СКТ-3	400	1...3,7	0,46	0,09	0,25	
САУ	450	1...5	0,36	-	-	
КАУ	400	"	0,33	-	-	

Таблица 4.6

Характеристика силикагелей и цеолитов

Марка силикагеля	Объем пор, см ³ /г	Насыпная плотность, кг/м ³	Основной размер гранул, мм	Площадь поверхности по БЭТ, м ² /г	Адсорбционная емкость, г/г	Область применения
КСМ N5	0,58	660	-	715	-	Поглощение паров полярных органических соединений
КСМ N6n	0,30	870	-	527	-	
КСМ N6с	0,36	870	-	624	-	
КСК	1,08	400 500	-	350	-	
МСК	0,80	400...500	-	210	-	
ЩСК	0,90	400...500	-	300	-	
МСМ	0,34	-	-	560...580	-	
КСС	0,60...0,85	-	-	500...650	-	
Алюмосиликаты	-	200...275	1,5...3	770	-	Адсорбция органических соединений из осушенных газов
3А, 4А.						
5 А, I3X						
КА	-	620	0,1...0,6	-	-	
NaA	-	650	-	-	-	
CaA	-	650	-	-	-	
CaX	-	600	-	-	-	
NaX	-	600	-	-	-	

Для проведения процесса адсорбции используются 2 группы аппаратов: адсорберы периодического и непрерывного действия [29].

Типы адсорберов периодического действия с неподвижной насадкой

представлены на рис. 4.17. Стрелками указаны вход и выход отбросных газов или направление их движения.

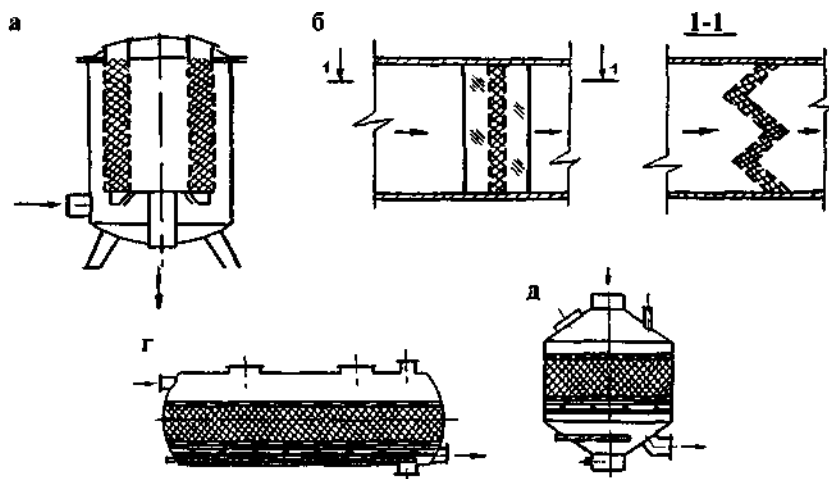


Рис. 4.17. Адсорберы с неподвижными адсорбером:

- а – вертикальный цилиндрический с вертикальным кольцевым слоем адсорбента;
 б – горизонтальный прямоугольного сечения с вертикальным слоем между гофрированными сетками; г – горизонтальный цилиндрический системы ВТР с горизонтальным слоем адсорбента; в – вертикальный цилиндрический системы ВТР с горизонтальным слоем

Адсорберы непрерывного действия обычно конструируют в виде колонн с провальными или беспровальными тарелками и решетками. В таких аппаратах организуется противоточное движение адсорбента и обрабатываемых газов.

В большинстве случаев очистка технологических газов ведется в адсорберах *периодического действия* с регенерацией адсорбента. Непрерывность очистки обеспечивают при этом компоновкой адсорберов, одновременно задействованных на различных стадиях процесса в группы от 2 до 4. При этом суммарная продолжительность стадий десорбции, осушки и охлаждения должна быть равна продолжительности адсорбции.

Отдельную группу представляют аппараты с подвижным адсорбентом, находящимся в режиме псевдооживления или фонтанирования.

На рис. 4.18 показана принципиальная схема непрерывного процесса адсорбции с циркулирующим псевдооживленным адсорбентом. Непрерывная адсорбция перспективна, так как позволяет интенсифицировать процесс и с помощью сравнительно небольшого количества адсорбента очищать с высокой эффективностью газов при их невысоких концентрациях.

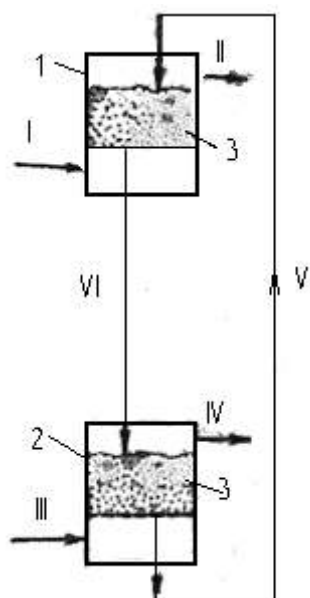


Рис. 4.18. Принципиальная схема адсорбера с циркулирующим псевдосжиженным адсорбентом:

1 – адсорбер; 2 – десорбер; 3 – псевдосжиженный адсорбент; I – подача очищаемого газа; II – выход очищенного газа; III – подача вытесняющего вещества (пара или инертного газа); IV – выход адсорбтива; V – линия передачи адсорбента из адсорбера в десорбер

Можно подобрать такую скорость подачи очищаемого газа через слой зернистого материала (адсорбента), при которой слой материала будет находиться во взвешенном состоянии, напоминая кипящую жидкость. Такой слой зернистого материала называют псевдосжиженным или кипящим.

При прохождении газа через слой материала происходит поглощение нежелательного компонента (адсорбтива). Очищенный газ покидает аппарат. Часть адсорбента постоянно спускается в десорбер для регенерации. Роль вытесняющего вещества при регенерации выполняет водяной пар или нагретый инертный газ. В десорбере также поддерживается кипящий слой адсорбента. Из него извлекается улавливаемое вещество (адсорбтив) и выводится из системы. Регенерированный адсорбент возвращается в адсорбер. Таким образом, происходит непрерывный процесс десорбции.

Основное *преимущество* метода адсорбции – высокая степень очистки от загрязняющих веществ.

Недостатки метода:

- сложность и громоздкость установки ввиду малой адсорбционной емкости адсорбентов;
- необходимость расхода теплоты на проведение регенерации сорбентов.

Абсорбционный метод основан на диффузии (молекулярной и турбулентной) газообразных примесей к поверхности раздела газ-жидкость и на их переходе в жидкую фазу. Абсорбционный метод и оборудование для его осуществления подробно рассмотрены в разделе 3.2.3.

В последние годы абсорбционный метод очистки от неприятно пахнущих веществ дополняется биохимической очисткой.

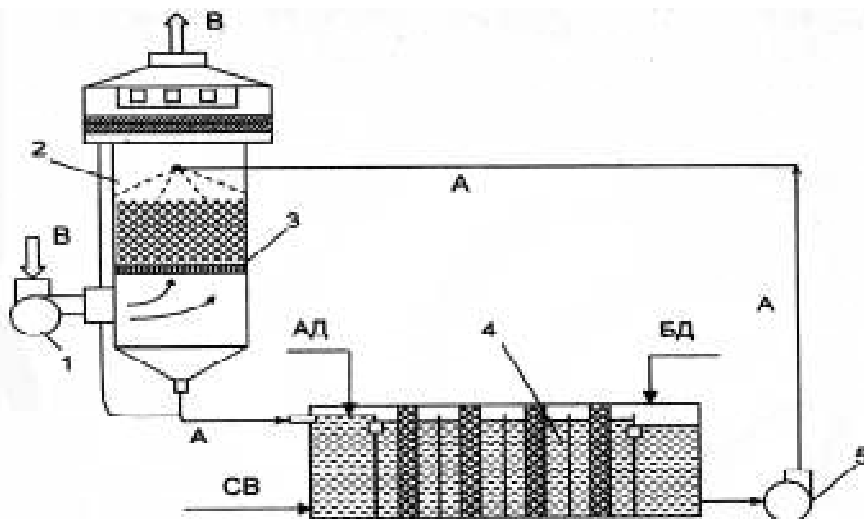


Рис. 4.19. Схема адсорбционно-биохимической установки: 1 – вентилятор; 2 – насадочный абсорбер; 3 – массообменная решетка; 4 – биореактор; 5 – насос; А – абсорбент; В – вентиляционный воздух; АД – абсорбционные добавки; БД – биогенные добавки; СВ – сжатый воздух

На рис. 4.19 приведена схема *адсорбционно-биохимической* установки (АБХУ), предложенной предприятием РУП «Промышленные экологические системы» (Белоруссия) для очистки вентиляционного воздуха от выбросов от технологических участков заливки, охлаждения и выбивки литейных форм со стержнями, изготовленными с применением синтетических смол.

В вентиляционном воздухе содержатся: бензол, фенол, формальдегид, цианиды, амины (триэтиламин, диметиламин), ксилол, толуол, аммиак, сернистый ангидрид, оксид углерода, широкая гамма ароматических углеводородов, смолистые вещества.

Улавливание вредных веществ производится абсорбентом на основе технической воды. Регенерация раствора происходит в биореакторе с помощью иммобилизованного на насадочном полотне штамма микроорганизмов с окислением органических веществ до углекислого газа, азота и воды.

Преимущества метода: высокая степень очистки 88 – 99% по перечисленным веществам; простота и надежность в эксплуатации (не требуется постоянный обслуживающий персонал; использование технической воды в качестве абсорбента; замкнутый цикл циркуляции абсорбента).

Недостатки метода: сложность и громоздкость установки; затраты на биогенные добавки, циркуляцию сорбента и сжатый воздух.

4.2.3. Очистка аэрозольных загрязнений методом фильтрации

Для очистки воздуха от аэрозолей используется большое количество различных аппаратов, основной частью которых является блок из фильтровального материала [44].

Волокнистые фильтры

Наиболее распространены (рис. 4.20) волокнистые фильтры типа ФВГ-Т (Ф – фильтр, В – волокнистый, Г – гальванический, Т – корпус из титана). В качестве фильтрующего материала используется иглопробивное волокно марки Т-2 (для улавливания тумана). Фильтры ФВГ предназначены для очистки аспирационного воздуха температурой $(5-50)^\circ\text{C}$ от ванн хромирования, содержащего туман и брызги электролита в виде смеси кислот – хромовой (концентрацией не более 370 г/л CrO и серной (концентрацией не более 3,5 г/л).

Внутри корпуса размещена кассета с фильтрующим материалом, наложенным на каркас и прижатым прижимной решеткой (из пруткового материала). Кассета изготовлена в виде вертикально расположенных складок. Установка и смена кассет осуществляется через монтажный люк.

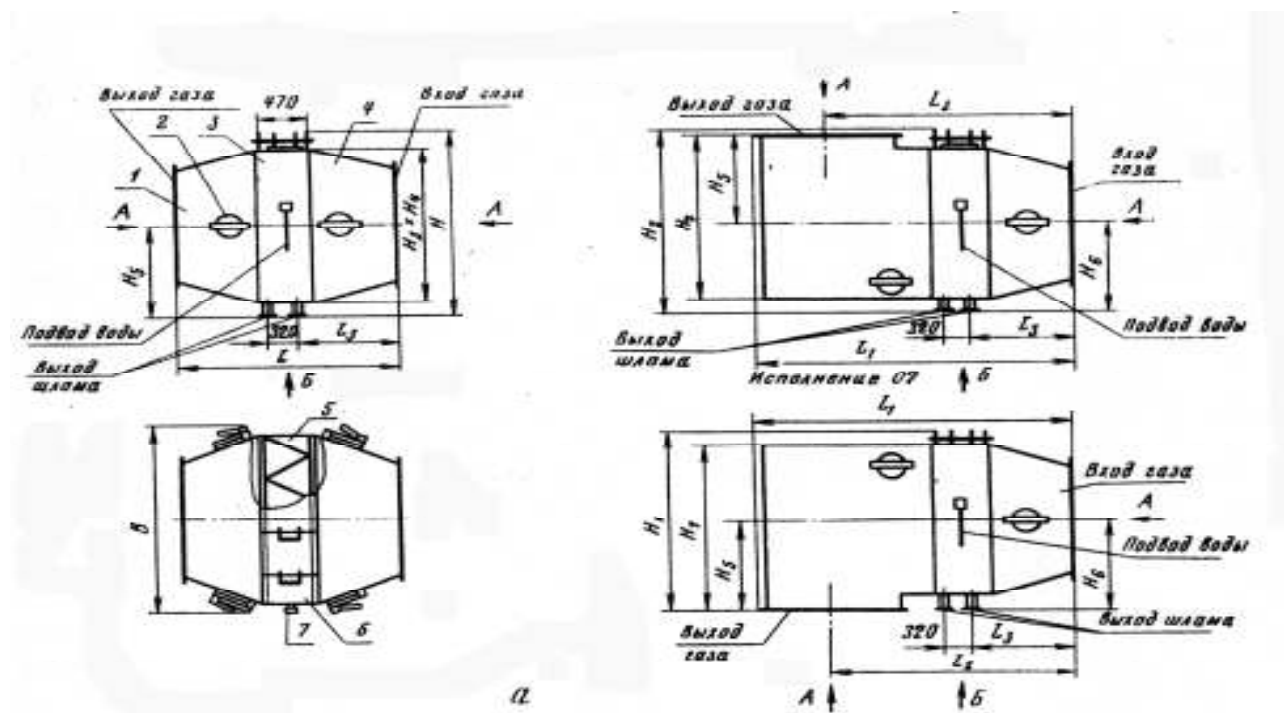


Рис. 4.20. Фильтр волокнистый типа ФВГ-Т: а – исполнения 01, 06 и 0.7; б – исполнения 08 и 09; 1 – камера выхода газа; 2 – люк; 3 – корпус; 4 – камера входа газа; 5 – кассета; 6 – монтажный люк; 7 – промывочное устройство

Фильтр работает в режиме накопления уловленного продукта на поверхности фильтрующего материала с частичным слоем жидкости. При достижении перепада давления 500 Па фильтр подвергается периодической промывке (обычно 1 раз в течение 15-20 суток) с помощью переносной форсунки, вводимой через промывочные люки. Изготавливают пять типоразмеров фильтров производительностью от 5000 до 80000 м³/ч.

Таблица 4.7

Технические характеристики

Типоразмер фильтра	Производительность по очищаемому газу, м ³ /ч	Площадь поверхности фильтрации, м ²	Масса, кг	Габариты, мм		
				L	H	B
ФВГ-Т(Ф)-0,37	≤5000	0,37	65	1150	750	560
ФВГ-Т(Ф)-0,74	≤10000	0,74	81	1110	755	810
ФВГ-Т(Ф)-1,6	≤20000	1,6	98	1150	960	870
ФВГ-Т(Ф)-3,2	≤40000	3,2	197	1410	975	1930
ФВГ-Т(Ф)-6,4	≤80000	6,4	≤300	1670	1805	1930

Для улавливания туманов разбавленных и концентрированных кислот (H₂SO₄, HF, HCl и др.) и крепких щелочей (NaOH и др.) применяются также **мокрые** волокнистые **туманоуловители**. На рис. 4.21 показан фильтр с цилиндрическим фильтрующим элементом, установленным в слое уловленной кислоты [45].

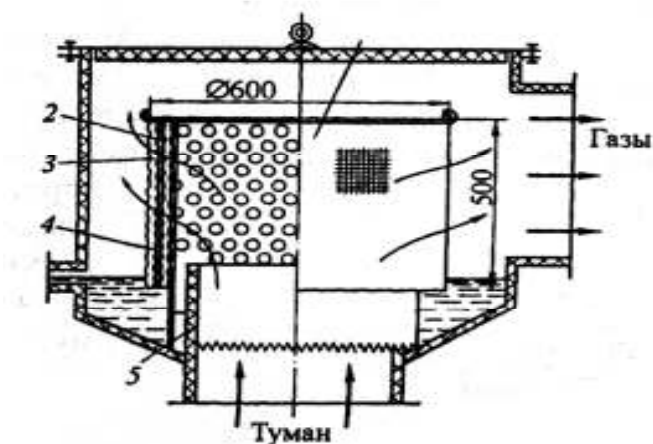


Рис. 4.21. Волокнистый туманоуловитель:

- 1 – цилиндрический фильтрующий элемент; 2 – фильтрующий войлок;
- 3, 4 – брызгоуловители; 5 – патрубок

Слой кислоты находится в пространстве, образованном входящим внутрь элемента патрубок и стенками корпуса. Фильтрующий элемент представляет собой перфорированный или решетчатый барабан с глухой крышкой. Соосно с ним установлен брызгоулавливающий элемент большего диаметра. На барабане

крепится пакет из виниловых сеток или складчатый грубоволокнистый войлок толщиной (3÷5)мм. Газы вводятся в фильтр внутрь фильтрующего элемента и на его внешнюю поверхность. Фильтры периодически промывают, например серной кислотой.

Ионообменные фильтры

Широко применяются на предприятиях химической, радиотехнической, электронной, металлургической и нефтехимической отраслях промышленности *ионообменные установки типа ASB*, разработанные предприятием МВП «Фильтр» и выпускаемые заводом «Ангстрем» (г. Москва).

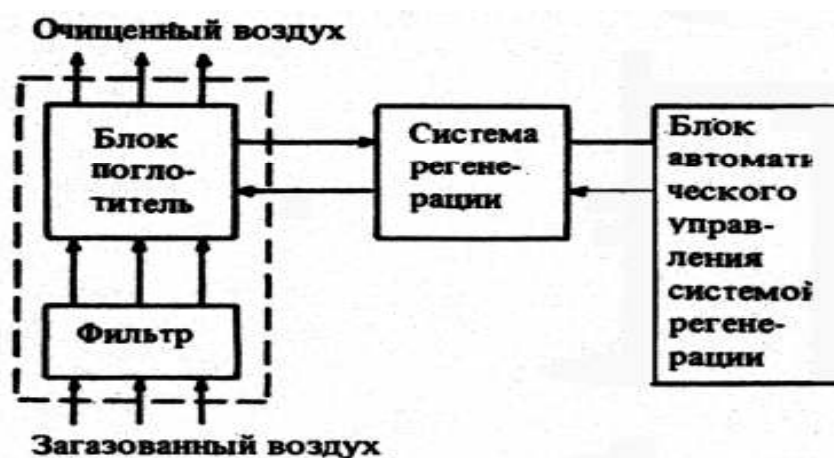


Рис. 4.22. Схема ионообменной установки ASB - 1500

Установка содержит ASB – 1500 содержит: фильтр для обеспыливания воздуха; блок-поглотитель для улавливания агрессивных газов; систему регенерации; блок управления системой регенерации.

Установка предназначена для улавливания газообразных и аэрозольных токсичных веществ: HF, HCl, HNO₃, H₂SO₄, H₂S, CO, CrO₃, Cl₂, Pb и др.

Воздух, подлежащий очистке, поступает через пылеулавливающий фильтр в блок- поглотитель, где происходит хемосорбция ионов токсичных веществ. Очищенный от пыли и газов воздух выпускается в атмосферу через вентиляционную систему. Блок управления автоматической регенерацией включает систему регенерации (в заданной последовательности и длительности интервалов), которая поддерживает высокоэффективную поглотительную способность ионообменной ткани блока - поглотителя, смачивая ее водой и специальными поглотительными растворами.

Научно-производственное предприятие «Сфера» (г. Саратов) производит тканевый *ионообменный* фильтр марки ИОФ - С.

Фильтр позволяет очищать вентвыбросы от машиностроительных и сборно-сварочных производств по обработке листового металла (газорезка, пламенная резка, плазменное нанесение металлических покрытий и др.). Производительность установки 1000 – 20000 м³/ч. Степень очистки 92- 98%.

Преимущества метода ионообменной очистки: высокая эффективность очистки –95-99 %; надежность работы и простота обслуживания.

Недостаток метода: трудности в подборе поглотителя при многокомпонентных смесях.

4.2.4. Биологическая очистка

Научно-производственное предприятие «Сфера» (г. Саратов) производит также биологический фильтр для очистки выбросов от вредных веществ органического происхождения, хлорорганики и дурнопахнущих вентвыбросов (рыбо, мясоперерабатывающих, табачных, пищевых и т.д. производств).

Производительность одного модуля по очищаемому воздуху составляет (10, 14, 20) тыс. м³/ч. Эффективность очистки от различных загрязняющих веществ приведена в табл. 4.8.

Таблица 4.8
Эффективность очистки загрязненного воздуха от вредных примесей

ИНГРЕДИЕНТ	ЭФФЕКТИВНЫЙ КПД, %	ИНГРЕДИЕНТ	ЭФФЕКТИВНЫЙ КПД, %
Стирол	95 ± 3	Бензол	85 ±10
М-ксилол	90 ±10	Этилбензол	93 ±3
Нафталин	85 ± 3	Этилацетат	99 ±1
Ацетальдегид	97 ± 3	Ацетон	98 ±2
Аммиак	96 ± 3	Формальдегид	96 ±3
Фенол	98± 3	Уайт-спирит	97 ±3
Бензин	94 ± 3	Циклогексанон	97 ±3
Бутанол	97 ± 3	Этанол	100
Бутилацетат	97 ± 2	Дихлорметил	92 ± 3
Ксилол	96 ± 2	Сольвент	96 ± 3
Меркаптаны	96 ± 3	Метанол	96 ± 3
Толуол	93 ± 3	Этилацетат	99 ± 1

4.2.5. Электростатическое улавливание аэрозолей

Электростатические фильтры предназначены для улавливания вредных выбросов, в том числе сварочных и масляных аэрозолей, а также пылевидных частиц в тех случаях, когда выделение вредностей имеет постоянное место, а концентрация аэрозолей в очищаемом воздухе не превышает $0,2 \text{ г/м}^3$.

На рис. 4.23 приведена конструкция электростатического стационарного фильтра (ФЭС-5000), производительностью по воздуху $5000 \text{ м}^3/\text{час}$ производства Камазэнергоремонт.

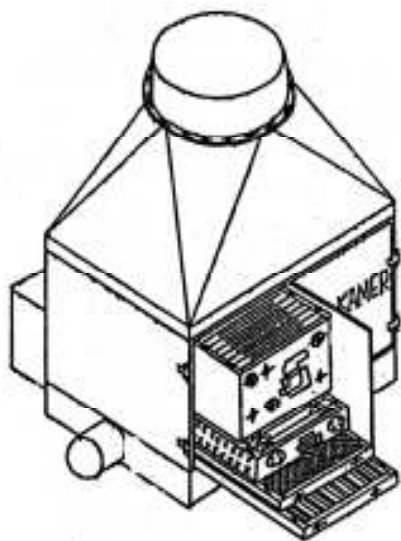


Рис. 4.23. Электростатический фильтр ФЭС -5000 стационарный

Внутри корпуса фильтра, оснащенного патрубками для подвода и отвода воздуха, располагаются предварительный фильтр, камера ионизации и осадительная камера.

Предварительный фильтр предназначен для улавливания грубодисперсных частиц и равномерного распределения загрязненного воздуха по отсекам. Состоит из сетчатых кассет. В случае установки фильтра на масляные аэрозоли перед сетчатыми кассетами устанавливаются жалюзийные.

В *камере ионизации* частиц аэрозоли, содержащиеся в загрязненном воздухе, получают положительный заряд за счет их прохождения через электрическое поле, создаваемое источником питания напряжением $12\ 000 \text{ В}$. Ионизация частиц аэрозоля осуществляется за счёт коронного разряда, который происходит между плоскими пластинами камеры ионизации.

В *осадительной камере* происходит улавливание поляризованных частиц

за счет осаждения на пластинах осадительных кассет, имеющих положительный электрический заряд. Напряжение питания – 8000 В.

Такие фильтры могут применяться в системах рециркуляции воздуха в комплекте с осевыми вентиляторами 06–320 № 6,3.

Преимущества установки: высокая степень очистки – (90-99)%; широкий диапазон улавливаемых частиц (0.005 – 100) мкм. *Недостатки*: высокое напряжение источника питания; электрическая опасность.

4.2.6. Методы очистки промышленных выбросов от пыли

При выборе методов очистки промышленных методов от пыли необходимы сведения о дисперсности, форме частиц и структуре (аморфная, зернистая, волокнистая); химическом составе, плотности, смачиваемости, электрических и оптических свойствах частиц, абразивности; способности к воспламенению и взрываемости.

Серийно изготавливаемое пылеулавливающее оборудование достаточно широко рассматривается в [29], [44], [45] и др. Наиболее распространенные типы пылезолоуловителей представлены в методическом пособии «Экозащитное оборудование» [42].

Для *ультратонкой очистки* вентиляционных выбросов, а также выбросов, содержащих сильнодействующие ядовитые вещества 1 класса опасности (соединения кадмия, свинца и т.п.), используются *фильтры-катриджи* (рис. 4.24), выпускаемые НПО «Сфера» (г.Саратов).



Рис. 4.24. Фильтр - катридж типа 4/12

Производительность фильтров по загрязненному воздуху составляет $(2000 - 12000)\text{м}^3/\text{ч}$. Ниже, в табл. 4.9 приведены основные характеристики фильтров – катриджей.

Таблица 4.9

Характеристика фильтров - катриджей

Типоразмер фильтра	1/2	2/4	3/6	4/8	4/12	3/9	2/6	1/3
Количество катриджей, шт.	4	8	12	16	24	18	12	6
Фильтрующая поверхность, м^2	24	48	72	96	144	108	72	36
Производительность по воздуху, $\text{м}^3/\text{ч}$	2000	4000	6000	8000	12000	9000	6000	3000

Малые габариты этих аппаратов позволяют установить фильтры-катриджи рядом с работающим оборудованием и вернуть очищенный воздух в цех (эффективность очистки – $(99,9-99,99)\%$), т.е. практически *исключаются* выбросы вредных веществ в атмосферу. *Преимущества* установки: высокая степень очистки; малые габаритные размеры. *Недостаток*: малая концентрация пыли на входе $\leq 150 \text{ мг}/\text{м}^3$.

В последние годы появилось большое количество *локальных пылеулавливающих* установок небольшой производительности, которые сочетают в себе несколько методов очистки, например, включают аппараты грубой и тонкой очистки. На рис. 4.25 представлена установка ЛПУ 1,5-10 для комплексной очистки выбросов от твердых частиц, изготавливаемая ООО «Гералекс» (г. Саратов) для очистки вентиляционных выбросов в зерноперерабатывающей, пищевой, резинотехнической промышленности.

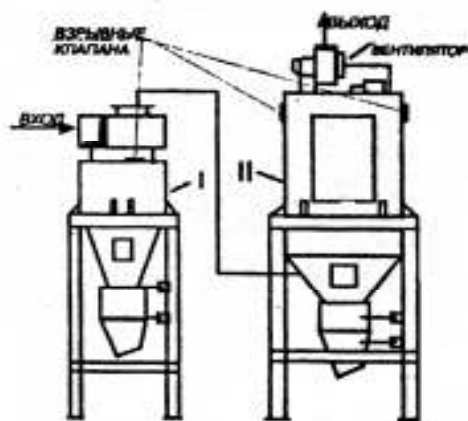


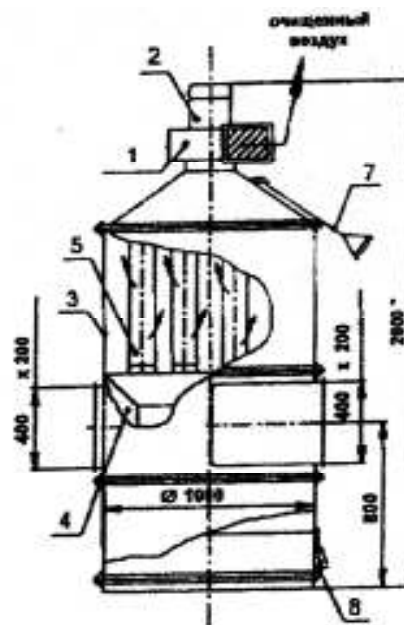
Рис. 4.25. Установка пылеулавливающая ЛПУ-1,5-10: I – фильтр-циклон ФЦ; II – фильтр рукавный встряхивающий

ЗАО фирма «ОЗОН» (Н.Новгород) разработала пылеулавливающие агрегаты для улавливания сухой пыли, отбираемой от укрытий абразивных кругов заточных, обдирочных и шлифовальных станков, а также других видов неслипающихся, неволокнистых пылей. На рис. 4.26 представлен один из аппаратов этой фирмы. Особенность конструкции заключается в том, что в одном агрегате совмещены две ступени очистки. Принцип работы агрегата основан на использовании центробежных сил, возникающих при вращении воздушно-пылевого потока внутри корпуса агрегата и последующей фильтрации потока в рукавах из фильтровальной ткани.

Воздушный поток через входной патрубок 6 поступает в цилиндрический корпус 3. Под действием центробежных сил крупные частицы пыли отбрасываются к стенке корпуса, теряют скорость и спадают в пылесборник. Мелкие частицы улавливаются фильтровальными рукавами 5, которые периодически очищаются с помощью встряхивающего механизма 7.

Фильтровальные рукава легкоъемные и крепятся к корпусу фильтра хомутами. Агрегат работает по рециркуляционной схеме. Очищенный воздух выбрасывается обратно в помещение.

Рис. 4.26. Пылеулавливающая установка ПУМА – 4000: 1 – вентилятор; 2 – электродвигатель; 3 – корпус; 4 – сухой циклон; 5 – фильтр тонкой очистки; 6 – входной патрубок; 7 – встряхивающий механизм; 8 – бункер



Достоинства аппарата: простота конструкции; надежность, долговечность; малое аэродинамическое сопротивление. Предприятием выпускается широкий модельный ряд агрегатов «ПУМА».

4.3. Примеры расчёта

4.3.1. Упрощённый расчёт автономной топочной камеры

Выбор автономных топочных камер производится исходя из необходимости обеспечения: достаточных температур для дожигания вредных примесей обезвреживаемой смеси; необходимого времени пребывания смеси в высокотемпературной зоне топочной камеры; достаточного теплового напряжения топочного объема.

Основная задача – определить расход топлива, необходимый для очистки выбросов. Необходимый расход топлива (без утилизации уходящих газов), м³/с (кг/с) определяется по известной формуле:

$$B = Q_T / (Q_i^r \cdot \eta), \quad (4.1)$$

где Q_T – расход теплоты, необходимый для нагрева выбросов до температуры обезвреживания, кВт; Q_i^r – низшая теплота сгорания топлива, используемого для обезвреживания, кДж/м³ (кДж/кг); η – КПД автономной топочной камеры.

$$Q_T = V_{\text{выбр}} \cdot c_v \cdot (t_T - t'_{\text{выбр}}), \quad (4.2)$$

где $V_{\text{выбр}}$ – расход обезвреживаемых выбросов, м³/с; c_v – средняя изобарная объёмная теплоёмкость выбросов в интервале температур от 0°С до t_T , кДж/(м³°С); t_T – температура эффективного обезвреживания, °С; $t'_{\text{выбр}}$ – температура выбросов, °С.

Для снижения расхода топлива на обезвреживание выбросов рекомендуется установка за топочной камерой котлов-утилизаторов, экономайзеров и других теплообменных поверхностей.

При утилизации уходящих газов расход топлива определяется аналогично по формуле (4.1), где Q_T , кВт:

$$Q_T = V_{\text{выбр}} \cdot c_v \cdot (t_T - t''_{\text{выбр}}), \quad (4.3)$$

где $t''_{\text{выбр}}$ – температура выбросов, нагретых в утилизационных агрегатах продуктами сгорания, °С.

Кроме того, если выбросы содержат горючие вещества, то при дожигании они выделяют определённую дополнительную теплоту. В этом случае ввиду использования потенциальной теплоты выбросов необходимый расход топлива (м³/с, кг/с) уменьшится:

$$B = [V_{\text{выбр}} \cdot c_v \cdot (t_T - t''_{\text{выбр}}) - Q_{\text{выбр}}] / (Q_i^r \cdot \eta), \quad (4.4)$$

где Q_i^r , η – см. ф-лу (4.1); $V_{\text{выбр}}$, c_v , t_T – см. ф-лу (4.2); $t''_{\text{выбр}}$ – температура нагретых в утилизационных агрегатах, °С; $Q_{\text{выбр}}$ – теплота выбросов, кВт.

$$Q_{\text{выбр}} = Q_{\text{хим}} = \sum Q_i^f \cdot V_{\text{г.в.}}, \quad (4.5)$$

где $Q_{\text{хим}}$ – химическая теплота горючих веществ, кВт; Q_i^f – низшая теплота сгорания горючих, кДж/м³; $V_{\text{г.в.}}$ – расход горючих компонентов обезвреживаемых выбросов, м³/с.

По расходу топлива подбирается горелочное устройство. Конструкция и габариты топочного устройства выполняются так, чтобы обеспечить необходимое время пребывания газов в зоне высоких температур. Объём топки, м³ рассчитывается по формуле:

$$V_T = Q_T / q_v, \quad (4.6)$$

где Q_T – теплота, необходимая для нагрева выбросов, кВт; q_v – теплонапряжение топочного объёма, кВт/м³. Для прямоточных конструкций топков q_v рекомендуется принимать не более 200 кВт/м³ [29]. Для циклонных топков эта величина может быть увеличена в 4...5 раз.

Затем определяется эквивалентный диаметр D_{eq} , длина l и высота h , м топочного устройства:

$$D_{\text{eq}} = 0,8 \sqrt[3]{V_T}, \quad (4.7)$$

$$l = (2,0 \dots 2,3) D_{\text{eq}} \quad (4.8)$$

$$h = (1,7 \dots 2,0) D_{\text{eq}} \quad (4.9)$$

Время пребывания обезвреживаемой смеси в топке:

$$\tau = V_T / V_{\text{тг}}, \text{ с}, \quad (4.10)$$

где V_T – объём камеры дожигания, м³; $V_{\text{тг}}$ – расход топливных газов (суммарный расход продуктов сгорания и выбросов), м³/с.

Примечание: при расчёте $V_{\text{тг}}$ учитывается доля выбросов, используемая в качестве дутьевого воздуха.

4.3.2. Расчёт возможности термического обезвреживания вентиляционных выбросов в топках существующих котлов и печей

Возможность термического обезвреживания вентиляционных выбросов в существующих топочных камерах определяется на основе анализа величин: расхода выбросов, содержащих в своем составе вредные вещества ($V_{\text{выбр}}$), и потребности в дутьевом воздухе ($V_{\text{дут}}$).

Если $V_{\text{выбр}} \leq V_{\text{дут}}$ даже при минимальной нагрузке топочной камеры, то это количество выбросов может быть подано на обезвреживание при условии, что примеси не окажут негативного воздействия на оборудование или аппаратуру котла (или печи).

При $V_{\text{выбр}} > V_{\text{дут}}$ анализируются следующие варианты:

1. возможность герметизации технологического оборудования, выделяющего вредные вещества, с целью снижения расхода выбросов;
2. подача части выбросов непосредственно в топочную камеру.

Во втором случае необходимо убедиться, что:

- достигаются условия безопасного горения, в частности стабилизация факела (при $\alpha \geq 1,8$ возможен отрыв факела);
- разбавление газов не вызовет резкого снижения температуры в топке;
- увеличение потерь теплоты с уходящими газами и рост аэродинамического сопротивления не окажут существенного влияния на эксплуатационные показатели.

Таким образом, для принятия окончательного решения о возможности термического обезвреживания необходим поверочный тепловой расчет котла (печи) в новых условиях работы.

Пример 4.1. Определить возможность термического обезвреживания вентиляционных выбросов, содержащих горючие компоненты, в действующей котельной предприятия.

Исходные данные: Расход обезвреживаемых выбросов $V_{\text{выбр}} = 8\,300 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Котельная с 3-мя котлами ДЕ-6,5-14 ГМ (летом работает 1 котёл). Топливо – природный газ с низшей теплотой сгорания $Q_i^r = 35,0 \text{ МДж/м}^3$. КПД брутто котельного агрегата $\eta_{\text{КА}}^{\text{бр}} = 92\%$. Значения $V_0^{\text{в}}$, $\alpha''_{\text{т}}$ принять самостоятельно.

Решение:

1. Расход топлива, потребляемого котлоагрегатом:

$$B_{\text{ка}} = \frac{D \cdot (h_{\text{нп}} - h_{\text{пв}}) + 0,01 p \cdot D \cdot (h_{\text{кв}} - h_{\text{пв}})}{Q_i^r \cdot \eta_{\text{КА}}^{\text{бр}}} =$$

$$= \frac{6500 \cdot (2789 - 419) + 0,01 \cdot 5 \cdot 6500 \cdot (826 - 419)}{35000 \cdot 0,92} = 482,5 \text{ м}^3/\text{ч}$$

2. Расход дутьевого воздуха на один котёл (летний период):

$$V_{\text{в}} = B_{\text{ка}} \cdot V_{\text{в}}^0 \cdot (\alpha''_{\text{т}} - \Delta\alpha_{\text{т}}) \cdot (t_{\text{в}} + 273,15) / 273,15 =$$

$$= 482,5 \cdot 9,52 \cdot (1,1 - 0,05) \cdot (30 + 273,15) / 273,15 = 5\,352,8 \text{ м}^3/\text{ч}$$

3. Расход дутьевого воздуха на три котла (зимний период):

$$V_{\text{в}} = 5\,352,8 \cdot 3 = 16\,058,4 \text{ м}^3/\text{ч}$$

4. Коэффициент избытка воздуха при подаче выбросов в летний период составит:

$$\alpha = V_{\text{выбр}} / (V_{\text{в}}^0 \cdot B_{\text{ка}}) = 8\,300 / (9,52 \cdot 482,5) = 1,81$$

Выводы:

- в зимний период термическое обезвреживание выбросов в существующих топках котлов **принципиально возможно** и не окажет негативного воздействия на

эксплуатационные показатели инсинератора, т.к. расход дутьевого воздуха (16 058 м³/ч) значительно превышает расход обезвреживаемых газов (8 300 м³/ч);

- в летний период работы котельной при подаче выбросов на обезвреживание коэффициент избытка воздуха на входе в топочную камеру **превысит допустимые пределы**. Следовательно, часть выбросов необходимо подать непосредственно в топочную камеру (мимо горелок) и выполнить тепловой расчёт котельного агрегата при работе в новых условиях.

Пример 4.2. Определить способ термического обезвреживания отходящих газов от реакторов окисления битума.

Исходные данные: Расход обезвреживаемых выбросов 2000 м³/ч. Усреднённый состав выбросов: CO=0,3%; H₂=3,9%; ΣC_nH_{2n+2}=2,2% (из них CH₄=1%; C₂H₆=0,7%; C₃H₈=0,5%); O₂=5,8%; CO₂=1%; N₂=86,8%. Теплоёмкость -1,46 кДж/м³°C

Решение:

1. Низшая теплота сгорания обезвреживаемой смеси:

$$Q_i^r = 0,01 \cdot (Q_{i(\text{CO})}^r \cdot \text{CO} + Q_{i(\text{H}_2)}^r \cdot \text{H}_2 + Q_{i(\text{CH}_4)}^r \cdot \text{CH}_4 + Q_{i(\text{C}_2\text{H}_6)}^r \cdot \text{C}_2\text{H}_6 + Q_{i(\text{C}_3\text{H}_8)}^r \cdot \text{C}_3\text{H}_8) =$$

$$= 0,01 \cdot (12640 \cdot 0,3 + 10800 \cdot 3,9 + 35840 \cdot 1 + 63730 \cdot 0,7 + 93370 \cdot 0,5) = 1730 \text{ кДж/м}^3$$

2. Необходимый объём воздуха на горение обезвреживаемой смеси с учётом наличия кислорода в газах реакторов окисления:

$$V_B^0 = 0,0476 \cdot \left(0,5 \cdot \text{CO} + 0,5 \cdot \text{H}_2 + 1,5 \cdot \text{H}_2\text{S} + \sum \left(m + \frac{n}{4} \right) \text{C}_m\text{H}_n - \text{O}_2 \right)$$

$$= 0,0476 \cdot (0,5 \cdot 0,3 + 0,5 \cdot 3,9 + 2 \cdot 1 + 3,5 \cdot 0,7 + 5 \cdot 0,5 - 5,8) = 0,155 \text{ м}^3/\text{м}^3$$

3. Теоретический объём азота в продуктах сгорания:

$$V_{\text{N}_2}^0 = 0,79 \cdot V_B^0 + \text{N}_2 / 100 = 0,79 \cdot 0,155 + 86,8 / 100 = 0,990 \text{ м}^3/\text{м}^3$$

4. Объём трехатомных газов:

$$V_{\text{RO}_2} = 0,01 \cdot (\text{CO}_2 + \text{CO} + \text{H}_2\text{S} + \sum m \cdot \text{C}_m\text{H}_n) =$$

$$= 0,01 \cdot (1 + 0,3 + 1 \cdot 1 + 2 \cdot 0,7 + 3 \cdot 0,5) = 0,052 \text{ м}^3/\text{м}^3$$

5. Теоретический объём водяных паров:

$$V_{\text{H}_2\text{O}}^0 = 0,01 \cdot (\text{H}_2\text{S} + \text{H}_2 + \sum (n/2) \cdot \text{C}_m\text{H}_n) + 0,0161 \cdot V_B^0 =$$

$$= 0,01 \cdot (3,9 + 2 \cdot 1 + 3 \cdot 0,7 + 4 \cdot 0,5) + 0,0161 \cdot 0,155 = 0,102 \text{ м}^3/\text{м}^3$$

6. Объём продуктов сгорания при α=1:

$$V_{\text{пс}} = V_{\text{N}_2}^0 + V_{\text{RO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}}^0 = 0,990 + 0,052 + 0,102 = 1,144 \text{ м}^3/\text{м}^3$$

7. Температура горения в топочной камере:

$$T_{\text{max}}^* = \frac{Q_i^r}{V_{\text{пс}} \cdot c_{\text{пс}}} = \frac{1730}{1,144 \cdot 1,46} = 1037^\circ\text{C}$$

С целью надежного дожигания горючих ингредиентов смеси температура в топочной камере должна превышать в 1,5-2,0 раза температуру воспламенения компонентов смеси.

Вывод:

- наибольшая температура воспламенения – у оксида углерода 652°C (см. табл. 4.1);
- температура в зоне обезвреживания токсичных горючих веществ (1037°C) превышает температуру воспламенения горючих компонентов смеси в 1,6 раза.

Таким образом, будет обеспечено автотермическое дожигание газов.

Контрольные вопросы к разделу 4.

1. Каковы особенности обезвреживания выбросов дожиганием? Охарактеризуйте условия, необходимые для эффективной очистки выбросов дожиганием.
2. Сопоставьте способы ввода обезвреживаемых выбросов в топочную камеру? Проанализируйте конструкции автономных топочных камер.
3. Приведите основы расчета автономной топки и охарактеризуйте этапы расчета.
4. Каковы условия огневого обезвреживания выбросов в топках существующих котлов и печей? Оцените изменения в работе топливосжигающего оборудования при подаче выбросов в топочную камеру.
5. Какие требования по безопасности предъявляются к газоздухопроводам, транспортирующим выбросы в установку термического обезвреживания?
6. Сопоставьте методы каталитического и термокаталитического обезвреживания вредных веществ. Каково их аппаратное исполнение?
7. Назовите области применения окислительных и восстановительных катализаторов.
8. Какие виды сорбционной очистки Вы знаете?
9. Какие существуют методы очистки от аэрозольных частиц?
10. Какие вещества улавливаются методом фильтрации газовых смесей?
11. Как осуществляется биологическая очистка вредных выбросов?
12. В чём заключается принцип аэростатического улавливания аэрозолей?
13. Какими устройствами можно очистить пылевые выбросы от ядовитых веществ?
14. В чём заключается принцип работы пылеулавливающей установки ЛПУ-1,5-10?
15. Назовите достоинства аппарата ПУМА-4000. Частицы какого фракционного состава улавливаются в данном аппарате?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Экологическая доктрина Российской Федерации, утверждённая распоряжением Правительства РФ от 31.08.2002г. № 1225-р
2. Закон РФ № 2061 – 1 «Об охране окружающей среды» от 19.12.91г.
3. Закон РФ № 96 ФЗ «Об охране атмосферного воздуха» от 4.05.99 г.
4. РД 34.02.305-98 Методика определения валовых выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от котельных установок ТЭС. – М.: 1998. – 23 с.
5. Методика определения выбросов загрязняющих веществ в атмосферу при сжигании топлива в котлах производительностью менее 30 тонн пара в час или менее 20 Гкал в час. – М.: 1999. – 43 с.
6. Методическое письмо НИИ Атмосфера № 335/33-07 от 17 мая 2000 г. «О проведении расчетов выбросов вредных веществ в атмосферу по «Методике определения выбросов вредных веществ в атмосферу при сжигании топлива в котлах производительностью менее 30 тонн пара в час или менее 20 Гкал в час».
7. Методическое пособие по расчёту, нормированию и контролю выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух (дополненное и переработанное) – СПб.: НИИ Атмосфера, 2005. – 138 с.
8. Методика расчета выбросов вредных веществ в атмосферу при сжигании попутного нефтяного газа на факельных установках – СПб.: НИИ Атмосфера, 1997.
9. Методика расчета выделений (выбросов) загрязняющих веществ в атмосферу при нанесении лакокрасочных материалов (по величинам удельных выделений) / Разраб. НИИ Атмосфера. Утв. приказом Гос. комитета РФ по охране окружающей среды от 12 ноября 1997 года N 497
10. Методика расчета выделений (выбросов) загрязняющих веществ в атмосферу при сварочных работах (по величинам удельных выделений) – СПб: НИИ Атмосфера, 1997.
11. Методика расчета выделений (выбросов) загрязняющих веществ в атмосферу при производстве металлопокрытий гальваническим способом (по величинам удельных показателей) – М.: Госкомэкология России, 2000.

12. Методика расчета выделений (выбросов) загрязняющих веществ в атмосферу при механической обработке металлов (по величинам удельных показателей) – М.: Госкомэкология России, 1997.

13. Методика расчета параметров выбросов и валовых выбросов вредных веществ от факельных установок сжигания углеводородных смесей – М.: Госкомэкология России, 1995.

14. Сборник методик по расчету выбросов в атмосферу загрязняющих веществ различными производствами. - Л.: Метеоиздат, 1986. - 183 с.

15. ГН 2.1.6.1338-03 (с доп. №1-5) Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населённых мест

16. Вредные химические вещества. Неорганические соединения элементов I-IV групп : справ. / под ред. В. А. Филова. –Л.: Химия, 1988.–512 с. : ил.

17. Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в российской федерации за 2008 г. – М.: Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Росгидромет, 2009. – 182 с.: ил.

18. Беспаятнов, Г. П. Предельно допустимые концентрации химических веществ в окружающей среде / Г. П. Беспаятнов, Ю. А. Кротов – Л.: Химия, 1985. – 528 с.

19. Иссерлин, А. С. Основы сжигания газового топлива: Справочное пособие / А. С. Иссерлин: 2-е изд., перераб. и доп.–Л.: Недра, 1987. –336с.: ил.

20. Ахмедов, Р. Б. Технология сжигания горючих газов и жидких топлив / Р.Б. Ахмедов, Л. М. Цирульников. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Недра, 1984. – 283 с: ил.

21. Лавров, Н. В. О механизме образования бенз/а/пирена / Н. В. Лавров, Н. Л. Стаскевич, Г.П. Комина // Доклад АН СССР.–1972.–т. 206–С.1363-1366

22. Лавров, Н. В. Некоторые вопросы теории пиролиза метана и возможные схемы сажеобразования / Н. В. Лавров // Химия твердых топлив. – 1976. – № 2. – С. 100-107

23. Шабад, Л. М. О циркуляции канцерогенов в окружающей среде /Л. М. Шабад. - М.: Медицина, 1973.

24. Сигал, И. Я. Защита воздушного бассейна при сжигании топлива / И. Я. Сигал. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – Л.: Недра, 1988. – 312 с.: ил.
25. Котлер, В. Р. Оксиды азота в дымовых газах котлов / В. Р. Котлер. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 144 с. : ил. – (Б-ка теплоэнергетика)
26. Лебедев, В. И. Расчёт и проектирование теплогенерирующих установок систем теплоснабжения: Учеб. пособие для вузов / В. И. Лебедев, Б. А. Пермяков, П. А. Хаванов. – М.: Стройиздат, 1992. – 360 с.: ил.
27. Тепловой расчёт котлов (Нормативный метод) / ЦКТИ– ВТИ: изд. 3-е, перераб. – Санкт-Петербург, 1988.- 258 с: ил.
28. Кривоногов, Б. М. Повышение эффективности сжигания газа окружающей среды / Б. М. Кривоногов. – Л.: Недра, 1986. – 280 с. : ил.
29. Зиганшин, М. Г. Проектирование аппаратов пылегазоочистки / М. Г. Зиганшин, А. А. Колесник, В. Н. Посохин – М.: Экспресс–3М, 1998 – 505с.: ил.
30. Котлер, В. Р. Экологические характеристики отопительных и промышленных котлов малой мощности / В. Р. Котлер, С. Е. Беликов / / Теплоэнергетика. – 1998. – № 2. – С.38–42
31. Сухарчук, Ю. С. Плавка чугуна в вагранках: Учебник для профессионального обучения рабочих на производстве. – 2-е изд., перераб. и доп. / Ю.С. Сухарчук, А. К. Юдкин – М.: Машиностроение, 1989. – 176 с.: ил.
32. Дубинская, Ф. Е. Очистка газов чугунолитейных вагранок / Ф.Е. Дубинская, Г. К. Лебедюк, Н. А. Пантюхов, А. К. Юдкин / / ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, 1978. – Обзорная информация: Промышленная и санитарная очистка газов. – Серия ХМ-14
33. Роддатис, К. Ф. Справочник по котельным установкам малой производительности / К. Ф. Роддатис, А. Н. Полтарецкий; под редакцией К.Ф. Роддатиса – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 488 с.: ил.
34. Экологические проблемы энергетики / Кошелев А. А., Ташкинова Г. В., Чебаненко Б. Б. и др.- Новосибирск: Наука.Сиб. отд-ние, 1989. – 322с. : ил.
35. Ионин, А. А. Газоснабжение: Учебник для вузов. / А. А. Ионин – М.: Стройиздат, 1989. – 430 с.: ил.

36. Немзер В. Г. Экология строительства региона нефтехимии / В. Г. Немзер, О. Г. Крестинская, И. И. Алмазов – М.: Стройиздат, 1993г –216 с.: ил.
37. Рихтер, Л. А. Охрана водного и воздушного бассейнов от выбросов тепловых электростанций: Учебник для вузов / Л. А. Рихтер, Э. П. Волков, В. Н. Покровский; под ред. П. С. Непорожного. –М.: Энергоиздат, 1981. –296 с.: ил.
38. Хофман, Е. Энерготехнологическое использование угля. Пер. с англ. / Е. Хофман – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 328 с.: ил.
39. Равич, М. Б. Газ и эффективность его использования в народном хозяйстве / М. Б. Равич – М.: Недра, 1987
40. Опыт применения технологии СКВ Денокс Топсе для очистки выхлопных газов дизельных двигателей и газовых турбин от оксидов азота : междунар. науч. – практ. семинар, 13 нояб. 2002 г. / Ком. охраны окружающей среды и природ. ресурсов Н. Новгорода : Компания «Хальдор Топсе А/О». – Н. Новгород, 2002. – 16 с.
41. Лебедева, Е. А. Дожигание токсичных компонентов продуктов сгорания котельных и вентиляционных выбросов с целью охраны окружающей среды / Е. А. Лебедева: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М. : МИСИ, 1982.
42. Лебедева, Е. А. Экозащитная техника в системах теплогазо-снабжения: учеб. пособие / Е. А. Лебедева, А. В. Гордеев. – Н.Новгород: ННГАСУ, 2007. – 60 с.
43. Спейшер, В. А. Огневое обезвреживание промышленных выбросов / В. А. Спейшер. – М. : Энергия, 1977. – 263 с. : ил.
44. Штокман, Е. А. Очистка воздуха: учеб. пособие для студентов по спец. 290700 "Теплогазоснабжение и вентиляция" / Е. А. Штокман; – М. : АСВ, 1999. – 319 с. : ил.
45. Швыдкий, В.С. Теоретические основы очистки газов: учебник для студентов вузов по направлению "Металлургия" / В. С. Швыдкий, М. Г. Ладыгичев, Д. В. Швыдкий. - М. : Машиностроение-1, 2001. - 502 с: ил.

Приложение А

Предельно допустимые концентрации вредных веществ в атмосферном воздухе для населенных мест

Вредное вещество	N CAS	Формула	ПДК, мг/м ³		Класс опасности
			максимально разовая	среднесуточная	
Азота диоксид	10102-44-0	NO ₂	0,2	0,04	3
Азота оксид	10102-43-9	NO	0,4	0,06	3
Ангидрид сернистый	7446-09-5	SO ₂	0,5	0,05	3
Бенз(а)пирен	50-32-8	C ₂₀ H ₁₂	-	0,1мкг/100м ³	1
Ванадия пентаксид	1314-62-1	V ₂ O ₅	-	0,002	1
Взвешенные вещества	-	-	0,5	0,15	3
Сажа по углероду	-	-	0,15	0,05	3
Углерода оксид	630-08-0	-	5	3	4
Бензол	71-43-2	C ₆ H ₆	0,3	0,1	2
Бутилацетат	123-86-4	C ₆ H ₁₂ O ₂	0,1	-	4
Азотная кислота	7697-37-2	HNO ₃	0,4	0,15	2
Дихлорэтан	1300-21-6	C ₂ H ₄ Cl ₂	3	1	2
Железо триоксид, железо оксид (в пересчете на железо)	1309-37-1	Fe ₂ O ₃ , FeO	-	0,04	3
Магний оксид	1309-48-4	MgO	0,4	0,05	3
Марганец и его соединения (в пересчете на марганец (IV) оксид)	-	-	0,01	0,001	2
Никель оксид /в пересчете на никель/	1313-99-1	NiO	-	0,001	2
Озон	10028-15-6	O ₃	0,16	0,03	1
Пыль неорганическая, содержащая двуокись кремния в %:					
- более 70	-	-	0,15	0,05	3
- 70-20	-	-	0,3	0,1	3
- менее 20	-	-	0,5	0,15	3

Пыль хлопковая	-	-	0,2	0,05	3
Вредное вещество	N CAS	Формула	ПДК, мг/м ³		Класс опасности
			максимально разовая	среднесуточная	
Свинец и его неорганические соединения /в пересчете на свинец/	7439-92-1	-	0,001	0,0003	1
Серная кислота /по молекуле H ₂ SO ₄ /	7664-93-9	H ₂ SO ₄	0,3	0,1	2
Фенолы сланцевые	-	-	0,007	-	3
Формальдегид	50-00-0	CH ₂ O	0,035	0,003	2
Фтористые газообразные соединения /в пересчете на фтор/: гидрофторид	7664-39-3	FN	0,02	0,005	2
Хлор	7782-50-5	Cl ₂	0,1	0,03	2
Хлорбензол	108-90-7	C ₆ H ₅ Cl	0,1	-	3
Хром /в пересчете на хрома (VI) оксид/	-	-	-	0,0015	1
Циклогексанон	108-94-1	C ₆ H ₁₀ O	0,04	-	3

Приложение Б

Коэффициенты, учитывающие влияние различных факторов на концентрацию бенз(а)пирена в продуктах сгорания



Рис. Б1 - Зависимость K_d от относительной нагрузки котла [5, рис. Е1 прил. Е]

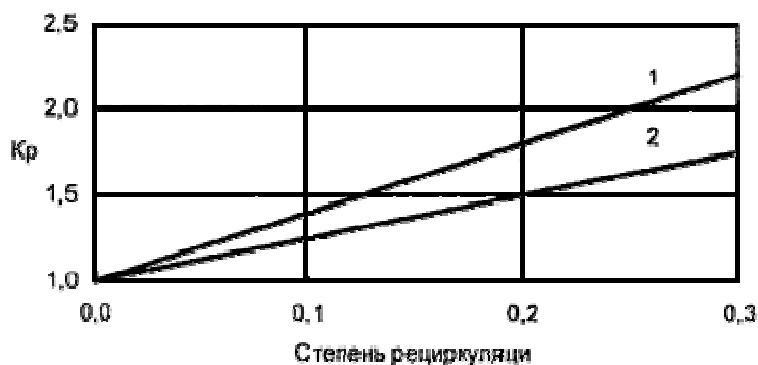


Рис. Б2 - Зависимость K_p от степени рециркуляции 1 - в дутьевой воздух или кольцевой канал вокруг горелок 2 - в щели под горелками [5, рис. Е2 прил. Е]

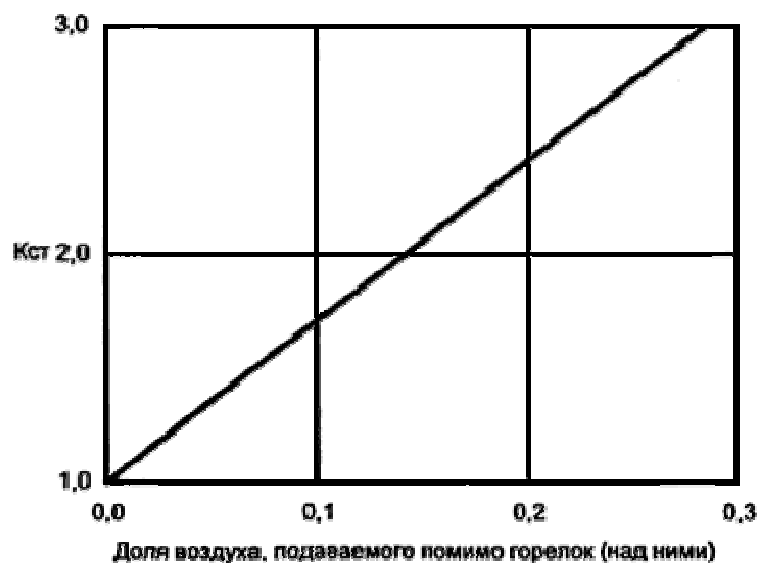


Рис. Е3 - Зависимость K_{ct} от доли воздуха, подаваемого помимо горелок [5, рис. Е3 прил. Е]

Приложение В

Удельные объемы отсасываемого воздуха при нанесении лакокрасочных покрытий, тыс. м³/час

Способ окраски	Для камер с нижним отсосом	Для бескамерной окраски	Для камер с боковыми и верхними отсосами	Для окраски электроосаждением
<i>Распыление:</i>				
– пневматическое;	1,8-2,2	2,2-2,5	3,4-3,8	-
– безвоздушное;	1,2-1,5	1,3-1,7	-	-
– гидроэлектростатическое;	-	0,9-1,1	-	-
– пневмоэлектрическое;	-	0,9-1,0	-	-
– электростатическое;	-	-	1,8-2,2	-
– горячее.	1,2-1,4	1,3-1,7	-	-
<i>Электроосаждение</i>	-	-	0,22-0,24	-
<i>Окунание</i>	-	-	1,0-4,0	-
<i>Струйный облив</i>	-	-	2,0-2,8	-

Удельное выделение пыли (г/с) основным технологическим оборудованием при механической обработке металлов без охлаждения

Наименование технологического процесса, вид оборудования	Определяющая характеристика оборудования	Выделяющиеся в атмосферу вредные вещества (г/с)		
		пыль абразивная	пыль метал.	другие виды пыли
Круглошлифовальные станки	100	0,010	0,018	
	150	0,013	0,020	
	300	0,017	0,026	
	350	0,018	0,029	
	400	0,020	0,030	
	600	0,026	0,039	
	750	0,030	0,045	
	900	0,034	0,052	
Плоскошлифовальные станки	175	0,014	0,022	
	250	0,016	0,026	
	350	0,020	0,030	
	400	0,022	0,033	
	450	0,023	0,036	
	500	0,025	0,038	
Бесцентрошлифовальные станки	30, 100	0,005	0,008	
	395, 500	0,006	0,013	
	480, 600	0,009	0,016	
Зубошлифовальные и резьбошлифовальные станки	Диаметр шлифовального круга, мм			
	75 - 200	0,005	0,008	
	200 - 400	0,007	0,011	
Внутришлифовальные станки	5 - 20	0,003	0,005	
	20 - 50	0,005	0,008	
	50 - 80	0,006	0,010	
	80 - 150	0,010	0,014	
	150 - 200	0,012	0,018	
Полировальные станки с войлочным кругом	Диаметр войлочного круга, мм			Пыль войлока и металлов
	100			0,013
	200			0,019
	300			0,027
	400			0,039
	500			0,050
600			0,063	

Наименование технологического процесса, вид оборудования	Определяющая характеристика оборудования	Выделяющиеся в атмосферу вредные вещества (г/с)		
		пыль абразивная	пыль метал.	другие виды пыли
Заточные станки	Диаметр шлифовального круга, мм			
	100	0,004	0,006	
	150	0,006	0,008	
	200	0,008	0,012	
	250	0,011	0,016	
	300	0,013	0,021	
	350	0,016	0,024	
	400	0,019	0,029	
	450	0,022	0,032	
	500	0,024	0,036	
	550	0,027	0,040	
Заточные станки с алмазным кругом	Диаметр алмазного круга,			Пыль неорганическая с содержанием оксида кремния выше 70%
	100	0,005		0,002
	150	0,007		0,003
	200	0,011		0,005
	250	0,014		0,006
	300	0,017		0,007
	350	0,021		0,009
	400	0,025		0,011
	450	0,028		0,012
	500	0,032		0,014
	550	0,035		0,015
Обработка деталей из стали:				
отрезные станки			0,203	
крацевальные станки			0,097	
Обработка деталей из алюминия: станки полированные с матерчатыми кругами с применением пасты ГОИ (мод. ВИЗ 9905-1415 и др.)	Диаметр матерчатого круга 450			Пыль: алюминия, текстильная, полировальной пасты 0,313

Приложение Д

Загрязняющие вещества, выделяющиеся при подготовке поверхности и нанесении гальванопокрытий

Назначение ванн	Выделяющиеся загрязняющие вещества
Анодное снятие сплава Декапирование в хромовой кислоте Железнение хлористое Лужение: кислое щелочное Меднение цианистое Никелирование химическое Обезжиривание: анодное и катодное и травление химическое электролитическое Оксидирование: Аллюминия, магниевых сплавов, стали щелочное (воронение) Снятие никелевого покрытия Травление алюминия, меди и их сплавов в концентрированной соляной кислоте и обезжиривание совместное катодное меди, алюминия и их сплавов химическое черных металлов Фосфатирование Хромирование Цинкование: цианистое	Щелочь Хромовый ангидрид Хлористый водород Серная кислота Щелочь Цианистый водород Аэрозоль никелевого раствора Цианистый водород, щелочь Серная кислота Щелочь Хромовый ангидрид Хромовый ангидрид Щелочь Оксиды азота Оксиды азота, щелочь Хлористый водород Серная кислота Серная кислота Оксиды азота, щелочь Фтористый водород Серная кислота Фтористый водород Хромовый ангидрид Цианистый водород

Евгения Андреевна Лебедева

**ОХРАНА ВОЗДУШНОГО БАССЕЙНА ОТ ВРЕДНЫХ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ ВЫБРОСОВ**

Учебное пособие для студентов специальностей
270109.65 Теплогазоснабжение и вентиляция и 140104.65 Промышленная
теплоэнергетика

Редактор Н. П. Гришуткина

Подписано в печать _____ Формат 60×90 1/16. Бумага газетная.
Печать трафаретная. Уч.- изд. л. Усл. печ. л.
Тираж 500 экз. Заказ № _____

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет», 603600,
Н.Новгород, ул. Ильинская, 65

Полиграфцентр ННГАСУ, 603950, Н.Новгород, ул. Ильинская, 65