

**С. И. Зеленский  
В. А. Рыжиков  
Я. Н. Сколяров**

**ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ  
ПРИ РАБОТЕ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ  
СИСТЕМ**

**Учебное пособие**

**Санкт-Петербург  
2022**

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
**«Санкт-Петербургский государственный университет  
промышленных технологий и дизайна»  
Высшая школа технологии и энергетики**

**С. И. Зеленский  
В. А. Рыжиков  
Я. Н. Сколяров**

**ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ  
ПРИ РАБОТЕ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ  
СИСТЕМ**

**Учебное пособие**

Утверждено Редакционно-издательским советом ВШТЭ СПбГУПТД

Санкт-Петербург  
2022

УДК 502.7:620.1(075)

ББК 26.23я7

З-486

*Рецензенты:*

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой теплосиловых установок и тепловых двигателей Высшей школы технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна

*В. Г. Злобин;*

главный специалист по котельным установкам и энергосбережению

ОАО «НПО ЦКТИ им. Ползунова»

*А. И. Дудинский*

**Зеленский, С. И.**

**З-486** Охрана окружающей среды при работе теплоэнергетических систем: учеб. пособие / С. И. Зеленский, В. А. Рыжиков, Я. Н. Сколяров. — СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2022. — 97 с.

ISBN 978-5-91646-324-8

Учебное пособие соответствует программам и учебным планам таких дисциплин, как «Охрана окружающей среды при работе теплоэнергетических систем», «Топливо и процессы горения в теплоэнергетических установках» для студентов, обучающихся по направлению подготовки 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника», профиль «Промышленная теплоэнергетика». В пособии рассмотрены основные выбросы в атмосферу при работе энергетических установок на различных видах топлива, проблемы утилизации твердых коммунальных отходов. Приведены примеры решения практических задач по изучаемой теме.

Пособие предназначено для подготовки бакалавров очной и заочной форм обучения. Отдельные разделы могут быть полезны аспирантам и специалистам, работающим в области охраны окружающей среды и экологии.

УДК 502.7:620.1(075)

ББК 26.23я7

ISBN 978-5-91646-324-8

© ВШТЭ СПбГУПТД, 2022

© Зеленский С. И., Рыжиков В. А.,

Сколяров Я. Н., 2022

# ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. ЗАКОНОДАТЕЛЬСТВО В ОБЛАСТИ ОХРАНЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ.....	6
1.1. Нормативные акты в области охраны атмосферного воздуха воды и почвы от загрязнения промышленными выбросами. Правовая охрана природы. Основные нормативные акты в РФ .....	6
1.2. Требование санитарных норм к допустимым уровням загрязнения атмосферного воздуха, воды и почвы. Санитарная охрана окружающей среды. Отличие санитарной охраны окружающей среды от охраны природы.....	7
1.2.1. Санитарно-эпидемиологические требования к обеспечению качества атмосферного воздуха.....	7
1.2.2. Санитарно-эпидемиологические требования к качеству воды питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения .....	9
1.2.3. Санитарно-эпидемиологические требования к качеству почвы .....	12
2. ТЕХНОЛОГИЯ ЗАЩИТЫ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА .....	15
2.1. Состав продуктов сгорания и вредные компоненты, образующиеся при горении топлива в энергетических установках .....	15
2.2. Материальный баланс процесса горения твердого и жидкого топлива....	15
2.3. Материальный баланс процесса горения газа.....	16
2.4. Образование вредных выбросов при сжигании органического топлива ..	17
2.5. Образование оксидов азота при сжигании органического топлива .....	17
2.6. Методы снижения образования оксидов азота .....	19
2.7. Способы по снижению максимальной температуры .....	20
2.8. Способы по снижению концентрации окислителя.....	21
2.9. Образование оксидов серы при горении органических топлив .....	24
2.10. Очистка дымовых газов от оксидов серы.....	26
3. ТЕХНОЛОГИЯ ЗАЩИТЫ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ .....	53
3.1. Классификация сточных вод и основные направления сокращения количества сточных вод на промышленных тепловых электростанциях.....	53
3.2. Нормирование содержания загрязняющих веществ в водоемах .....	54

3.3. Способы и аппараты для очистки промышленных сточных вод.	
Расчет предельно допустимого сброса. ....	58
3.3.1. Расчет песколовков.....	59
3.3.2. Расчет отстойника.....	61
3.3.3. Химическая очистка сточных вод (физико-химические методы очистки сточных вод) .....	63
3.3.4. Реагентная нейтрализация.....	64
3.3.5. Биологическая очистка.....	65
4. ТВЕРДЫЕ ОТХОДЫ И ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОЧВЫ ....	66
4.1. Твердые бытовые отходы. Описание отходов. Классификация .....	66
4.2. Существующие способы сбора, хранения и переработки твердых бытовых отходов .....	69
4.3. Совместная утилизация твердых древесных отходов и отходов целлюлозно-бумажного производства .....	77
4.4. Ликвидация твердых коммунальных отходов в энергетической установке малой мощности.....	82
РАСЧЕТЫ ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ С ПРОДУКТАМИ СГОРАНИЯ ТОПЛИВ .....	90
Пример № 1 .....	90
Пример № 2.....	93
Пример № 3.....	94
Пример № 4.....	94
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	96

## ВВЕДЕНИЕ

Быстрый рост потребления энергии сопровождается, как известно, увеличением вредных выбросов, загрязняющих окружающую среду. Тепловые электростанции, котельные, потребляя огромное количество газообразного, жидкого и твердого топлива, выбрасывают в атмосферу продукты сгорания, содержащие золу, оксиды серы и оксиды азота, а также в меньших количествах оксиды углерода и группу органических соединений, называемых полициклическими ароматическими углеводородами. Учитывая важность вышеизложенной проблемы, в нашей стране и за рубежом проводятся многочисленные исследования, связанные с изучением и разработкой практических мероприятий по данному вопросу.

В учебном пособии рассматриваются основные выбросы в атмосферу при работе энергетических установок (ТЭС и котельные) на различных видах топлива. Учитывая особое внимание в последнее время к проблеме утилизации твердых коммунальных отходов (ТКО), данный раздел также представлен в учебном пособии. Такой подход связан с большим влиянием на окружающую среду. Исходя из желания совместить теоретические и практические подходы по рассматриваемой проблеме, в пособии приведены примеры решения практических задач по рассматриваемой теме. Это должно помочь более углубленному изучению предлагаемого для студентов материала.

# **1. ЗАКОНОДАТЕЛЬСТВО В ОБЛАСТИ ОХРАНЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ**

## **1.1. Нормативные акты в области охраны атмосферного воздуха воды и почвы от загрязнения промышленными выбросами. Правовая охрана природы. Основные нормативные акты в РФ**

К основным нормативным актам в области охраны атмосферного воздуха, воды и почвы от загрязнения, а также охраны природы относятся следующие федеральные законы:

– Федеральный закон от 10.01.2002 № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды». Данный закон определяет задачи всего природоохранительного законодательства РФ, регулирует отношения в сфере взаимодействия общества и природы с целью сохранения природных богатств и естественной среды обитания человека, возникающие при осуществлении хозяйственной и иной деятельности, связанной с воздействием на природную среду. Закон определяет правовые основы государственной политики в области охраны окружающей среды, обеспечивающие сохранение благоприятной окружающей среды, биологического разнообразия, в целях удовлетворения потребностей общества. Закон закрепляет право граждан на здоровую и благоприятную окружающую среду.

– Федеральный закон от 30.03.1999 N 52-ФЗ «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения». Настоящий Федеральный закон направлен на обеспечение санитарно-эпидемиологического благополучия населения как одного из основных условий реализации конституционных прав граждан на охрану здоровья и благоприятную окружающую среду;

– Федеральный закон от 04.05.1999 N 96-ФЗ «Об охране атмосферного воздуха». Настоящее законодательство определяет полномочия органов государственной власти, к которым относится: создание и определение единой государственной политики в сфере охраны атмосферного воздуха на территории РФ; определение порядка проектирования деятельности в области охраны среды и создание экологических и гигиенических документов по 8 уровню качества среды в атмосфере; создание цельной нормативно-методической базы в сфере охраны атмосферного воздуха; создание федеральных целевых программ. В законе закреплены наиболее принципиальные положения, касающиеся охраны воздушного бассейна от загрязнений и шумов, от электромагнитного, радиационного и иного воздействия, предотвращения истощения кислородных запасов, рационального использования воздуха в хозяйственных целях, воспроизводства его запасов в интересах оздоровления и улучшения окружающей человека природной среды; содержатся нормы о запрещении ввода в эксплуатацию любых производственных объектов, если они не оснащены очистными устройствами и сооружениями и в процессе работы могут стать источниками загрязнения

воздушной среды, а также о запрещении эксплуатации транспортных средств, в выбросах которых содержание загрязняющих веществ превышает установленные нормативы;

– Федеральный закон от 24.06.1998 N 89-ФЗ «Об отходах производства и потребления». Документ, в котором описаны основные принципы деятельности, заключающейся в проводимых манипуляциях с разными видами отходов, относящихся к разным классам по степени опасности. Этим нормативным правовым актом закреплено важнейшее положение о том, что отходы не являются бесхозными. На них распространяется право собственности в соответствии с нормами гражданского кодекса российской федерации. Именно поэтому собственник отходов несет бремя содержания и должен заботиться о том, чтобы отходы не нарушали прав, свобод и законных интересов других лиц.

– «Водный кодекс Российской Федерации» от 03.06.2006 N 74-ФЗ (ред. от 02.08.2019). Нормативный правовой акт, регулирующий совместно с гражданским законодательством водные и имущественные отношения, связанные с оборотом водных объектов. ВК РФ вступил в действие 3 июня 2006 года. В данном Кодексе определяются нормы, регулирующие отношения по использованию и охране водных объектов и такие понятия как: акватория; водное хозяйство; водный объект; водный режим; водный фонд; водоотведение; водопользователь и другие.

## **1.2. Требование санитарных норм к допустимым уровням загрязнения атмосферного воздуха, воды и почвы. Санитарная охрана окружающей среды. Отличие санитарной охраны окружающей среды от охраны природы**

### **1.2.1. Санитарно-эпидемиологические требования к обеспечению качества атмосферного воздуха**

Атмосферный воздух должен отвечать гигиеническим нормативам по предельно допустимым концентрациям загрязняющих веществ (максимальным или минимальным их значениям) (далее – ПДК), ориентировочным безопасным уровням воздействия (далее – ОБУВ), предельно допустимым уровням физического воздействия (далее – ПДУ), а также по биологическим факторам, обеспечивающим их безопасность для здоровья человека.

Хозяйствующие субъекты в соответствии с осуществляемой ими деятельностью должны проводить работы по обоснованию безопасности для человека новых видов продукции и технологии ее производства, критериев безопасности и (или) безвредности факторов среды обитания и разрабатывать методы контроля за факторами среды обитания.

Запрещается выброс загрязняющих веществ, не имеющих утвержденных гигиенических нормативов (ПДК, ОБУВ).



Расчет канцерогенных и неканцерогенных рисков должен осуществляться хозяйствующими субъектами в соответствии с осуществляемой ими деятельностью при: установлении, изменении, прекращении существования санитарно-защитных зон в соответствии с требованиями нормативных правовых актов Российской Федерации, определяющими порядок установления таких зон; обосновании седьмой подзоны приаэродромной территории.

Уровень авиационного шума не должен превышать ПДУ эквивалентного уровня звука для дневного и ночного времени суток, определенный гигиеническими нормативами для территорий, непосредственно прилегающих к жилой застройке.

Не допускается превышение гигиенических нормативов содержания загрязняющих веществ в атмосферном воздухе:

в жилой зоне –  $\leq 1,0$  ПДК (ОБУВ); на территории, выделенной в документах градостроительного зонирования, решениях органов местного самоуправления для организации курортных зон, размещения санаториев, домов отдыха, пансионатов, туристских баз, организованного отдыха населения, в том числе пляжей, парков, спортивных баз и их сооружений на открытом воздухе, а также на территориях размещения лечебно-профилактических учреждений длительного пребывания больных и центров реабилитации –  $\leq 0,8$  ПДК (ОБУВ).

Эксплуатация объектов, являющихся источниками химического, физического, биологического воздействия на среду обитания человека (далее – источники воздействия), создающих с учетом фона по указанным факторам ПДК (ОБУВ) и (или) ПДУ, превышающие гигиенические нормативы на границе санитарно-защитной зоны или на территориях и объектах, указанных в пункте 70 Санитарных правил, осуществляется их правообладателями при условии разработки и реализации санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий, направленных на снижение уровней воздействия до ПДК (ОБУВ), ПДУ на границе санитарно-защитной зоны или на указанных территориях, объектах.

Требование о разработке и реализации санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий, предусмотренных абзацем первым настоящего пункта, не применяется в отношении выбросов загрязняющих веществ, для которых комплексным экологическим разрешением в соответствии со статьей 31.1 Федерального закона от 10.01.2002 N 7-ФЗ «Об охране окружающей среды» (Собрание законодательства Российской Федерации, 2002, N 2, ст. 133; 2019, N 52, ст. 7768, ст. 7771) установлены технологические нормативы.

Санитарно-противоэпидемические (профилактические) мероприятия проводятся в отношении источников воздействия (объектов), создающих химическое, физическое, биологическое воздействие, превышающие 0,1 ПДК (ОБУВ) и (или) ПДУ на: границе земельного (земельных) участка (участков) объекта (объектов); границе полосы отвода для автомобильных дорог и железнодорожных линий (далее – полоса отвода); границе объектов недвижимости или участков недр, предоставляемых в пользование, в случаях,

когда законодательством Российской Федерации размещение объекта допускается без оформления прав на земельные участки и установления сервитута, а также объекта, архитектурно-строительное проектирование которого допускается в границах, не принадлежащего застройщику или иному правообладателю земельного участка (далее – граница объекта).

Санитарно-защитные зоны устанавливаются в случаях и порядке, предусмотренном законодательством Российской Федерации.

В пределах земельных участков, расположенных в границах санитарно-защитных зон, должны соблюдаться ограничения использования земельных участков, установленные в соответствии с законодательством Российской Федерации.

Хозяйствующие субъекты, эксплуатирующие источники воздействия, обязаны:

- в целях подтверждения соблюдения гигиенических нормативов обеспечивать проведение лабораторных исследований на границе санитарно-защитной зоны с учетом характеристик производственных процессов и метеорологических характеристик окружающей среды в объеме и с периодичностью, определенными программой производственного контроля;

- проводить работы по обоснованию безопасности для человека новых видов продукции и технологии ее производства, критериев безопасности и (или) безвредности факторов среды обитания и разрабатывать методы контроля за факторами среды обитания;

- информировать население, органы местного самоуправления, территориальный орган федерального органа исполнительной власти, осуществляющего функции по контролю и надзору в сфере обеспечения санитарно-эпидемиологического благополучия населения, обо всех случаях аварийных ситуациях, аварийных и внеплановых выбросах в атмосферный воздух, представляющих угрозу санитарно-эпидемиологическому благополучию населения, и принятых мерах по их устранению. При осуществлении производственного контроля за уровнями загрязнения атмосферного воздуха на границе санитарно-защитной зоны должны применяться правила отбора проб (образцов) и методы их исследований (испытаний) и измерений, установленные в соответствии с законодательством Российской Федерации.

Нормативы допустимых выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух устанавливаются в соответствии с требованиями законодательства Российской Федерации об охране окружающей среды.

### **1.2.2. Санитарно-эпидемиологические требования к качеству воды питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения**

Качество и безопасность питьевой и горячей воды должны соответствовать гигиеническим нормативам.

Качественной признается питьевая вода, подаваемая абонентам с использованием систем водоснабжения, если при установленной частоте контроля в течение года не выявлены:

- превышения уровней гигиенических нормативов по микробиологическим (за исключением ОМЧ, ОКБ, ТКБ, *Escherichia coli*), паразитологическим, вирусологическим показателям, уровней вмешательства по радиологическим показателям; превышения уровней гигиенических нормативов ОМЧ, ОКБ, ТКБ и *Escherichia coli* в 95 % и более проб, отбираемых в точках водоразбора, при количестве исследуемых проб не менее 100 за год;

- превышения уровней гигиенических нормативов органолептических, обобщенных показателей, неорганических и органических веществ более, чем на величину ошибки метода определения показателей.

При несоответствии качества подаваемой питьевой и горячей воды, за исключением показателей качества питьевой воды и горячей воды, характеризующих ее безопасность, хозяйствующим субъектом, осуществляющим водоснабжение, организуются и проводятся санитарно-противоэпидемические (профилактические) мероприятия, обеспечивающие:

- выявление и устранение причин ухудшения ее качества и безопасности обеспечения населения питьевой водой;

- отсутствие угрозы здоровью населения в период действия временных отступлений, подтвержденной результатами санитарно-эпидемиологической оценки риска здоровью населения;

- максимальное ограничение срока действия временных отступлений, установленного по результатам санитарно-эпидемиологической оценки риска здоровью населения; информирование населения о введении временных отступлений и сроках их действия, отсутствии риска для здоровья населения, а также рекомендациях для населения по использованию питьевой и горячей воды.

Хозяйствующие субъекты, осуществляющие водоснабжение и эксплуатацию систем водоснабжения, должны осуществлять производственный контроль по программе производственного контроля качества питьевой и горячей воды, разработанной и согласованной в соответствии с Правилами осуществления производственного контроля качества и безопасности питьевой воды, горячей воды, установленными постановлением Правительства Российской Федерации от 06.01.2015 N 10 (Собрание законодательства Российской Федерации, 2015, N 2, ст. 523) и приложениями № 2–№ 4 к Санитарным правилам.

Хозяйствующий субъект, осуществляющий эксплуатацию системы водоснабжения и (или) обеспечивающий население питьевой и горячей водой, должен информировать (в течение 2 часов по телефону и в течение 12 часов в письменной форме с момента возникновения аварийной ситуации, технических нарушений, получения результата лабораторного исследования проб воды) территориальный орган федерального органа исполнительной власти, осуществляющего федеральный государственный санитарно-эпидемиологический надзор:

– о возникновении на объектах и сооружениях системы водоснабжения аварийных ситуаций или технических нарушений, которые приводят или могут привести к ухудшению качества и безопасности питьевой и горячей воды и условий водоснабжения населения;

– о каждом результате лабораторного исследования проб воды, не соответствующем гигиеническим нормативам по микробиологическим, паразитологическим, вирусологическим и радиологическим показателям, а по санитарно-химическим – превышающем гигиенический норматив на величину допустимой ошибки метода определения в контрольных точках «перед подачей в распределительную сеть» и «в распределительной сети».

Хозяйствующий субъект, осуществляющий эксплуатацию системы водоснабжения и (или) обеспечивающий население питьевой и горячей водой, обязан немедленно принять меры по устранению ситуаций, указанных в настоящем пункте Санитарных правил.

Перечень показателей, по которым осуществляется производственный контроль, и требования к установлению частоты отбора проб должны соответствовать санитарно-эпидемиологическим требованиям, приведенным в приложении № 2 к Санитарным правилам.

Хозяйствующие субъекты, обеспечивающие эксплуатацию системы водоснабжения и (или) обеспечивающие население питьевой и горячей водой, должны проводить работы по обоснованию безопасности для человека новых видов продукции и технологии производства, критериев безопасности и (или) безвредности факторов среды обитания и разрабатывать методы контроля за факторами среды обитания.

Не допускается наличие в питьевой воде посторонних включений и поверхностной пленки.

При вводе в эксплуатацию вновь построенных, реконструируемых систем водоснабжения, а также после устранения аварийных ситуаций хозяйствующими субъектами, обеспечивающими эксплуатацию системы водоснабжения и (или) обеспечивающими население питьевой и горячей водой, должна проводиться их промывка и дезинфекция с обязательным лабораторным контролем качества и безопасности питьевой и горячей воды.

Промывка и дезинфекция сети считается законченной при соответствии качества воды сети гигиеническим нормативам.

Температура горячей воды в местах водоразбора централизованной системы горячего водоснабжения должна быть не ниже плюс 60 °С и не выше плюс 75 °С.

Выбор места расположения водозаборных сооружений источников нецентрализованного водоснабжения населения должен осуществляться водопользователем на основании геологических и гидрогеологических данных, а также результатов обследования близлежащей территории с учетом наличия возможных источников микробного или химического загрязнения воды.

Водозаборные сооружения нецентрализованного водоснабжения необходимо размещать на удаленном месте, не менее чем на 50 метров выше по потоку грунтовых вод от источников загрязнения.

Водозаборные сооружения нецентрализованного водоснабжения не должны размещаться на участках, затапливаемых паводковыми водами, в заболоченных местах, а также местах, подвергаемых оползням, а также ближе 30 метров от автомагистралей.

Геологические и гидрологические данные должны содержать сведения о глубине залегания грунтовых вод, направлении потока грунтовых вод, ориентировочной мощности водоносного пласта, возможности взаимосвязи с водоносными горизонтами и поверхностными водными объектами.

Надземная часть водозаборных сооружений должна иметь укрытие для предотвращения загрязнения воды водоисточника.

Территория вокруг каптажного сооружения должна быть ограждена. Для защиты каптажного сооружения от затопления поверхностными водами должны быть оборудованы отстоки с уклоном в сторону водоотводной канавы.

В радиусе ближе 20 метров от источника нецентрализованного водоснабжения не допускается мытье транспортных средств, стирка и полоскание белья, другие виды деятельности, способствующие загрязнению воды водоисточника.

Чистка оборудования источника нецентрализованного водоснабжения должна проводиться хозяйствующими субъектами, обеспечивающими эксплуатацию системы водоснабжения и (или) обеспечивающими население питьевой водой, не реже одного раза в год. После каждой чистки или ремонта должна проводиться дезинфекция водозаборных сооружений с последующей промывкой и контролем качества и безопасности питьевой воды.

При ликвидации нецентрализованного источника водоснабжения водопользователь должен провести тампонаж водоисточника.

### **1.2.3. Санитарно-эпидемиологические требования к качеству почвы**

Содержание потенциально опасных для человека химических и биологических веществ, биологических и микробиологических организмов в почвах на разной глубине, а также уровень радиационного фона не должны превышать гигиенические нормативы.

На территориях жилой застройки, индивидуальных жилых домов, прогулочных, игровых и спортивных площадок, организаций воспитания и обучения, отдыха и оздоровления детей и молодежи, медицинских организаций, организаций социального обслуживания в почве должны отсутствовать:

- ПДК или ориентировочно допустимых концентраций (далее – ОДК) химических загрязнений;
- возбудители кишечных инфекций, патогенных бактерий, энтеровирусов;
- возбудители кишечных паразитарных заболеваний, яйца геогельминтов, цисты (ооцисты), кишечных патогенных простейших, вызывающие заболевания человека и общие для человека и животных;
- преимагинальные формы синантропных мух.

Использование почв в зависимости от степени их химического, бактериологического, паразитологического и энтомологического загрязнения должно осуществляться в соответствии с приложением № 9 к Санитарным правилам и гигиеническими нормативами.

На стадии инженерных изысканий хозяйствующим субъектом, осуществляющим инженерные изыскания, проводится обследование для получения предварительной оценки санитарно-эпидемиологического состояния почв территории проектируемого строительства на соответствие гигиеническим нормативам по химическим, микробиологическим, паразитологическим показателям.

Перечень химических показателей должен включать определение показателей:

- содержания тяжелых металлов: свинец, кадмий, цинк, медь, никель, мышьяк, ртуть;
- содержания 3,4-бензапирена и нефтепродуктов;
- кислотность (рН);
- суммарного показателя загрязнения.

Собственники многоэтажных и индивидуальных жилых домов, прогулочных, игровых и спортивных площадок, площадок отдыха, рекреационных зон, организаций воспитания и обучения, отдыха и оздоровления детей и молодежи, медицинских организаций, организаций социального обслуживания, зон санитарной охраны водоемисточников после ввода их в эксплуатацию должны обеспечить проведение лабораторных исследований качества почвы на соответствие гигиеническим нормативам (приложение № 9 к Санитарным правилам).

Радиационный контроль почвы на соответствие гигиеническим нормативам проводится в каждом случае строительства зданий и сооружений.

Грунты и их смеси, используемые в целях благоустройства населенных территорий, должны отвечать гигиеническим нормативам к качеству почв.

Главная цель санитарной охраны заключается в обеспечении санитарно-эпидемиологического благополучия населения, т. е. такого состояния общественного здоровья и среды обитания людей, при котором отсутствует опасное и вредное влияние ее факторов на организм человека и есть благоприятные условия для его деятельности. Основная масса загрязнения воздуха приходится на долю крупных городов.

Госкомсанэпиднадзор России, его центры в республиках, краях, областях, городах и районах, научно-исследовательские учреждения, лаборатории и другие учреждения составляют систему органов санитарно-эпидемиологической службы РФ. Эта служба выполняет свои задачи посредством санитарного нормирования, осуществления разрешительных, надзорных и контрольных функций.

Санитарное нормирование окружающей среды представляет собой установление предельно допустимых концентраций загрязняющих веществ, радиоактивных излучений, шума, вибрации, вредного воздействия магнитных полей и других физических, химических, биологических воздействий.

Разрешительные функции в области охраны окружающей среды и здоровья человека выполняются санэпидслужбой в трех формах:

1) выдача заключений на размещение предприятий и сооружений, их технико-экономическое и экологическое обоснование, на ввод объектов в эксплуатацию;

2) разрешение на применение химических и иных токсических веществ в отдельных отраслях народного хозяйства;

3) ведение регистра потенциально опасных химических и биологических веществ.

Суть надзорной функции заключается в организации систематической проверки соблюдения санитарного законодательства предприятиями, учреждениями, организациями и жителями города.

Санитарное нормирование окружающей среды представляет собой установление предельно допустимых концентраций загрязняющих веществ, радиоактивных излучений, шума, вибрации, вредного воздействия магнитных полей и других физических, химических, биологических воздействий.

Охрана окружающей среды (или охрана природы, защита природы) – комплекс мер, предназначенных для ограничения отрицательного влияния деятельности человека на окружающую среду (природу) и предотвращения ее деградации.

## 2. ТЕХНОЛОГИЯ ЗАЩИТЫ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА

### 2.1. Состав продуктов сгорания и вредные компоненты, образующиеся при горении топлива в энергетических установках

Процесс сжигания топлива в теплоэнергетических установках всегда сопровождается выделением продуктов сгорания этого топлива или, как их еще называют, дымовых газов. Дымовые газы целесообразно полезно использовать в качестве источника тепловой энергии, по этой причине в тех же котельных установках можно увидеть множество теплообменных поверхностей, таких как: пароперегреватель, водяной экономайзер, воздухоподогреватель и т. п. Целью данного решения, помимо полезного использования выделенного тепла путем теплопередачи от дымовых газов к холодному теплоносителю в теплообменных поверхностях, является еще и экологическая составляющая. В процессе выброса дымовых газов в атмосферу их температура имеет значительную роль в вопросе экологии. Концентрации некоторых вредных выбросов, таких как например оксиды азота, очень сильно зависят от температуры продуктов сгорания топлива, поэтому есть нормы и правила, которые задают определенные дозволённые границы тех или иных параметров.

Каждое топливо имеет свой определенный состав, от которого, соответственно, зависит и состав продуктов сгорания. Для того чтобы определить состав дымовых газов, стоит начать с состава используемого сырья. В этом случае на помощь приходит материальный баланс процесса горения топлива.

Поскольку в основе процесса горения лежит реакция окисления горючих компонентов топлива, то материальный баланс процесса горения выражает количественное соотношение между исходными компонентами (топливо и окислитель) и конечными продуктами (дымовые газы, они же продукты сгорания), отнесенное к единице объема (или массы) топлива. Для твердого и жидкого топлива материальный баланс составляется на 1 кг топлива, для газообразного – на 1 м<sup>3</sup> сухого газа при нормальных условиях.

### 2.2. Материальный баланс процесса горения твердого и жидкого топлива

Горючие составляющие топлива вступают в химическое реагирование с кислородом в строго определенном количественном соотношении, определяемом из стехиометрических уравнений полного горения углерода, водорода и серы, записанных для 1 кмоль каждого горючего элемента:





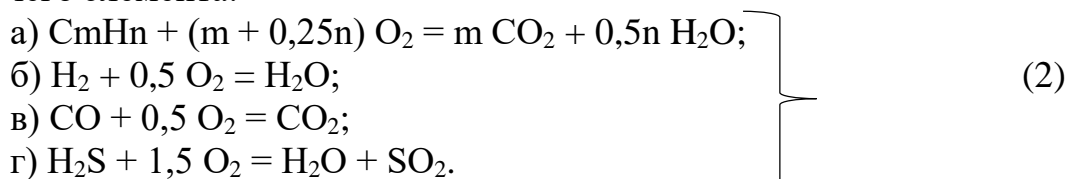
При расчете объемов воздуха и продуктов сгорания условно принимают, что все горючие составляющие окисляются полностью, т. е. в соответствии с реакциями (1а, 1б, 1в). Из уравнения (1а) следует, что для полного окисления одного моля углерода (молекулярная масса углерода  $\mu_C = 12$  кг) расходуется 1 моль кислорода и образуется 1 моль двуокиси углерода  $CO_2$ . Выразив газообразные составляющие ( $O_2$  и  $CO_2$ ) в объемных единицах (объем 1 моль любого газа при нормальных условиях составляет  $22,4$  м<sup>3</sup>), получим, что для полного сгорания 1 кг углерода потребуется  $22,4/12 = 1,866$  м<sup>3</sup>  $O_2$ , при этом образуется  $1,866$  м<sup>3</sup>  $CO_2$ .

При известном составе рабочей массы в 1 кг топлива содержится  $(C_r / 100)$  кг углерода, а для его полного сгорания необходимо:  $1,866 \cdot (C_r / 100)$  м<sup>3</sup>  $O_2$ , и при этом образуется  $1,866 \cdot (C_r / 100)$  м<sup>3</sup>  $CO_2$ . Аналогично, из уравнения (1б) на окисление водорода ( $\mu_{H_2} = 2,02$  кг), содержащегося в 1 кг топлива, потребуется  $0,5 \cdot (22,4/2,02) \cdot (H_r / 100)$  м<sup>3</sup>  $O_2$ , при этом образуется  $(22,4/2,02) \cdot (H_r / 100)$  м<sup>3</sup> водяного пара, а как следует из уравнения (1в), на окисление горючей серы ( $\mu_S = 32$  кг), содержащейся в 1 кг топлива, потребуется  $(22,4/32) \cdot (S_r / 100)$  м<sup>3</sup>  $O_2$ , и образуется такой же объем  $SO_2$ .

В результате полного сгорания топлива образуются газообразные продукты, которые состоят из  $CO_2$ ,  $SO_2$ ,  $H_2O$  и  $N_2$ . Оксиды углерода и серы являются сухими трехатомными газами, которые принято объединять и обозначать  $RO_2 = CO_2 + SO_2$ . При сжигании, например, жидкого топлива в составе дыма присутствуют оксиды углерода (до 50 %), оксиды серы (до 20 %), оксиды азота (до 6–8 %), углеводороды (5–20 %) и другие.

### 2.3. Материальный баланс процесса горения газа

Газообразное топливо представляет собой смесь различных горючих и негорючих газов. Основными горючими составляющими большинства газообразных топлив являются предельные углеводороды метанового ряда, а также водород, оксид углерода и иногда сероводород. Негорючий балласт газообразного топлива, как правило, состоит из двуокиси углерода, азота и кислорода. Для газообразного топлива материальный баланс составляется на 1 м<sup>3</sup> сухого газа при нормальных условиях. Как уже отмечалось, горючие составляющие газа вступают в химическое реагирование с кислородом в определенном количественном соотношении, определяемом из стехиометрических уравнений горения углеводородов (общая формула  $C_mH_n$ ), водорода  $H_2$ , оксида углерода  $CO$  и сероводорода  $H_2S$ , записанных для 1 кмоль каждого горючего элемента:



При расчете объемов воздуха и продуктов сгорания условно принимают, что все горючие составляющие окисляются полностью, т. е. в соответствии с

реакциями (2а, б, в, г). Из уравнения (2б), например, следует, что для полного окисления 1 моль водорода потребуется 0,5 моль кислорода, и образуется 1 моль водяного пара  $H_2O$ . Объем 1 моль любого газа при нормальных условиях – величина постоянная ( $22,4 \text{ м}^3$ ), следовательно, для полного сгорания 1  $\text{м}^3$  водорода потребуется 0,5  $\text{м}^3$  кислорода, при этом образуется 1  $\text{м}^3$   $CO_2$ .

## **2.4. Образование вредных выбросов при сжигании органического топлива**

Как известно, сжигание органического топлива пагубно влияет на экологическую сферу окружающего мира, причиной тому служит наличие вредных выбросов в составе продуктов сгорания (оксиды азота, оксиды серы, диоксид углерода и др.) и несгоревшем остатке топлива.

Содержание вредных выбросов в дымовых газах и их концентрация зависят от нескольких факторов, таких как: агрегатное состояние топлива, состав топлива, параметры топлива и т. п.

Кроме того, дымовые газы содержат до 1,5–2,0 % не сгоревшего в энергетической установке топлива, которое наряду с пылью, сажой и золой оседает на поверхности земли и воды. В дымовых газах содержится более 200 высокотоксичных ядовитых элементов, соединений и веществ, из которых до 1,5 % являются смертельными для живых организмов. При этом в дымовых газах присутствуют соединения, такие, как альдегиды, формальдегиды, бенз(о)пирен, относящиеся к отравляющим веществам.

При сжигании твердого топлива, прежде всего, угля в атмосферу с дымовыми газами поступает летучая зола, частицы которой содержат углерод, диоксид кремния, окислы алюминия и железа, серу, некоторые органические соединения, тяжелые металлы и другие химические элементы. При сжигании жидкого и газового топлива выход твердых частиц значительно меньше, однако они и газообразные продукты характеризуются высокими концентрациями многих вредных химических веществ.

На сегодняшний день в мире существуют различные способы и методы по снижению концентрации вредных выбросов в атмосферу и предотвращению их возникновения в целом.

## **2.5. Образование оксидов азота при сжигании органического топлива**

С развитием энергетических технологий появляются все новые устройства и агрегаты, с помощью которых можно сжечь органическое топливо и большинство из них оказывают все более пагубное экологическое влияние на окружающую среду.

Котельные, ТЭС и ТЭЦ в процессе своей работы выбрасывают большое количество вредоносных отходов через дымовую трубу, как например: зола, оксиды серы, оксиды азота, оксид углерода и диоксид углерода.

Если говорить о газообразных выбросах, то наиболее токсичными из них являются оксиды азота.

При окислении азота образуются различные соединения, такие как: оксид азота (NO), диоксид азота (NO<sub>2</sub>), гемииоксид азота (N<sub>2</sub>O), азотистый ангидрид (N<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), тетраоксид диазота (N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) и азотный ангидрид (N<sub>2</sub>O<sub>5</sub>).

Особое внимание с точки зрения экологии к себе приковывают оксид азота (NO) и диоксид азота (NO<sub>2</sub>), суммарная концентрация которых, как правило, обозначается NO<sub>x</sub>.

Наиболее токсичным и опасным для живых организмов, в частности для человека, является диоксид азота (NO<sub>2</sub>).

Для того чтобы в этом убедиться, достаточно сравнить предельно допустимую концентрацию (ПДК) в приземном слое воздуха, указанную в нормативных документах различных стран мира. В России ПДК для оксида азота (NO) составляет – 0,6 мг/м<sup>3</sup>, в то время как для диоксида азота (NO<sub>2</sub>) предельно допустимая концентрация равняется – 0,085 мг/м<sup>3</sup>.

При превышении допустимых значений ПДК и длительном воздействии, возможны самые разные последствия: от воспаления легких до отека легких и летального исхода.

Именно по этой причине проблема вредных выбросов крайне актуальна, и специалисты всеми силами и способами стараются снизить концентрацию выбросов оксидов азота до максимально низких значений.

Источниками образования оксидов азота могут являться азотсодержащие компоненты топлива, либо азот, вносимый в зону активного горения с воздухом, который в свою очередь необходим для осуществления процесса горения топлива. По этой причине оксиды азота принято делить на 2 основные группы:

- воздушные;
- топливные.

Воздушные оксиды азота также делятся на две группы:

- термические (механизм Зельдовича);
- быстрые (механизм Фенимора).

Для возникновения термических оксидов азота по механизму Зельдовича главным условием является высокая температура на начальном этапе формирования факела и в активной зоне горения – от 1600 °С и выше. Также термические оксиды азота могут возникать и без процесса горения, если кислород, входящий в состав воздуха, вносимого в топку, нагреть до необходимой температуры.

Быстрые оксиды азота по механизму Фенимора получили такое название в связи с тем, что они образуются непосредственно в узкой зоне фронта ламинарного пламени при сравнительно небольших температурах, около 750 °С.

Образование топливных  $\text{NO}_x$  происходит на начальном участке факела, при горении летучих веществ, выделившихся из частиц угля или мазутных капель. Одновременно с образованием оксидов азота происходит восстановление  $\text{NO}$  до безвредного молекулярного азота  $\text{N}_2$ , причем соотношение между окислительными и восстановительными реакциями определяется наличием свободного кислорода или других окислителей. Применительно к топочным устройствам энергетических котлов можно утверждать, что количество образующихся оксидов азота определяется кинетикой процессов, т. к. время пребывания в высокотемпературной зоне значительно меньше времени, необходимого для достижения равновесных концентраций.

## 2.6. Методы снижения образования оксидов азота

На данный момент существует 2 основных метода снижения концентрации оксидов азота:

- пассивный метод (осуществляется посредством специально оборудованных установок для очистки дымовых газов, смонтированных между последней тепловоспринимающей поверхностью котла и дымовой трубой);
- активный метод (осуществляется с помощью подавления процесса образования  $\text{NO}_x$  на начальной стадии их формирования).

Если рассматривать данные методы, то с точки зрения эффективности и экономичности выгоднее использовать активный метод, который не требует дорогостоящего и энергозатратного оборудования.

Основными причинами возникновения оксидов азота являются высокая температура и концентрация окислителя (кислорода) на этапе формирования факела.

При сжигании природного газа топливные оксиды азота отсутствуют, так как он, за редким исключением, не содержит связанного азота, но зато при сжигании мазута, и особенно всех видов твердого топлива (торфа, сланцев, бурых и каменных углей) доля топливных  $\text{NO}$  весьма велика.

Основные способы снижения  $\text{NO}_x$  делятся на 2 группы:

- снижение максимальной температуры;
- снижение концентрации окислителя.

К способам по снижению максимальной температуры относятся:

- установка двусветных экранов;
- рассредоточение факела по высоте топки;
- рециркуляция дымовых газов;
- снижение температуры горячего воздуха;
- низкотемпературные способы сжигания;
- впрыск влаги.

К способам по снижению концентрации окислителя относятся:

- ступенчатое сжигание;

- нестехиометрическое сжигание;
- горелки высокотемпературного восстановления в факеле;
- горелки с затянутым смесеобразованием;
- снижение коэффициента избытка воздуха.

## 2.7. Способы по снижению максимальной температуры

Простейшим способом снижения концентрации  $\text{NO}_x$  является уменьшение нагрузки котла. Снижение нагрузки котла сопровождается снижением температур в топке за счет уменьшения объемного тепловыделения и температуры подогрева воздуха.

Рециркуляция дымовых газов также является простейшим средством снижения температуры, а следовательно, и концентрации оксидов азота в дымовых газах. При сжигании газа, когда отсутствуют слабо зависящие от температуры топливные оксиды азота, эффективность рециркуляции газов весьма велика. Ограниченность применения этого метода снижения выбросов оксида азота объясняется тем, что рециркуляция дымовых газов снижает экономические показатели (возрастают потери с уходящими газами и расход электрической энергии на собственные нужды). Также возникают дополнительные сложности в связи с необходимостью установки дымососа рециркуляции и коробов для подачи дымовых газов к горелкам.

Для снижения температуры топочного процесса можно уменьшить температуру горячего воздуха. Снижение максимальной температуры в топочной камере, а следовательно, и концентрации оксидов азота, можно обеспечить увеличением теплоотвода.

Снижение температурного уровня за счет ввода влаги в зону горения является одним из возможных путей сокращения выбросов оксидов азота при сжигании природного газа, недостатком является то, что может возникнуть нестабильность воспламенения и понизится эффективность сгорания топлива.

Суть низкотемпературного способа сжигания топлива состоит в том, что в котле создается вихрь, обеспечивающий более интенсивное горение. Топливо сгорает полностью, вплоть до мельчайших частиц. В обычных топках пылеугольного сгорания практически все топливо сгорает в нижней части, а в топках для НТВ-технологии – зона активного горения намного шире, за счет этого температура внутри распределяется более равномерно, а максимальная температура в вихревой топке ниже на несколько сотен градусов (обычно до 300 °С).

## 2.8. Способы по снижению концентрации окислителя

Простейшим способом является снижение избытка воздуха, подаваемого через горелки. Сказанное относится только к тому диапазону избытков воздуха, который применяется обычно в энергетических котлах ( $1,0 \leq \alpha \leq 1,2$ ). При этом уменьшаются потери с уходящими газами, которые являются наибольшими в котлоагрегатах, и снижается расход электроэнергии на собственные нужды. Главным недостатком данного способа является тот факт, что при чересчур низком значении коэффициента избытка воздуха возникает химический недожог топлива, что негативно повлияет на процесс горения и экологическую составляющую в целом.

Нестехиометрическое сжигание организуется за счет топливно-воздушного разбаланса по горелкам или ярусам горелок. Воздушный разбаланс обеспечивается за счет прикрытия индивидуальных воздушных шиберов перед отдельными горелками. Топливный разбаланс организуется за счет прикрытия топливных клапанов перед выделенными горелками. При этом догорание топлива происходит при традиционных избытках воздуха после смешения продуктов сгорания из окислительной и восстановительной зон.

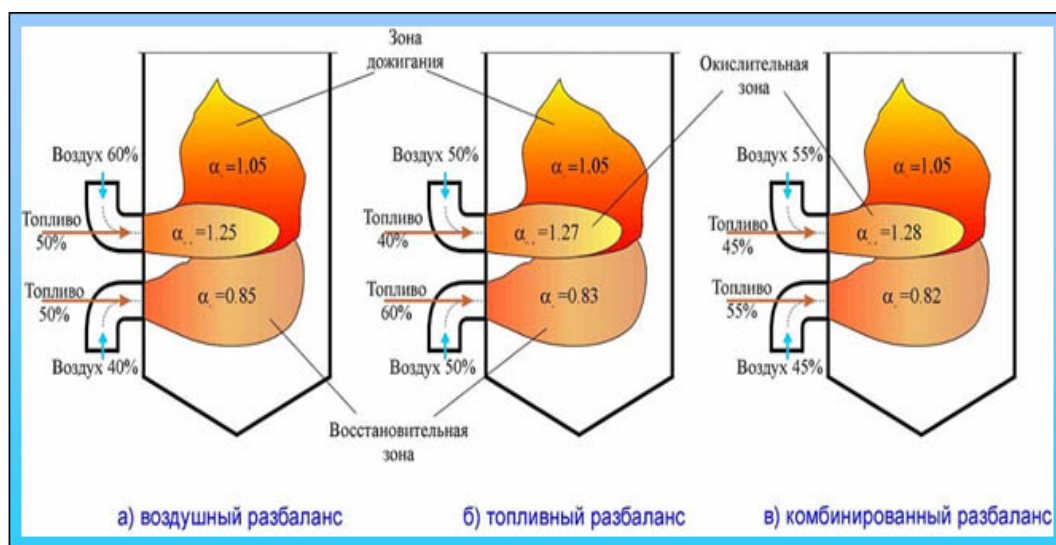


Рис. 1. Виды топливно-воздушного разбаланса при нестехиометрическом сжигании

Нестехиометрическое сжигание позволяет снизить выбросы оксидов азота:

- для твердого топлива – до 80 %;
- для газа и мазута – до 50 %.

Разновидностью нестехиометрического сжигания является метод ступенчатого сжигания, когда через основные горелки подается только часть

воздуха, а остальной необходимый для полного сгорания топлива воздух подается далее по высоте факела через специальные сопла.

В котлах с многоярусным расположением горелок в качестве сопел третичного дутья могут быть использованы горелки верхнего яруса (в том случае, если остальные горелки позволяют нести номинальную нагрузку). При этом на начальном участке факела воспламенение и горение летучих происходят при пониженной концентрации кислорода, в результате чего подавляются как топливные, так и термические оксиды азота. На второй ступени подавляются термические оксиды.

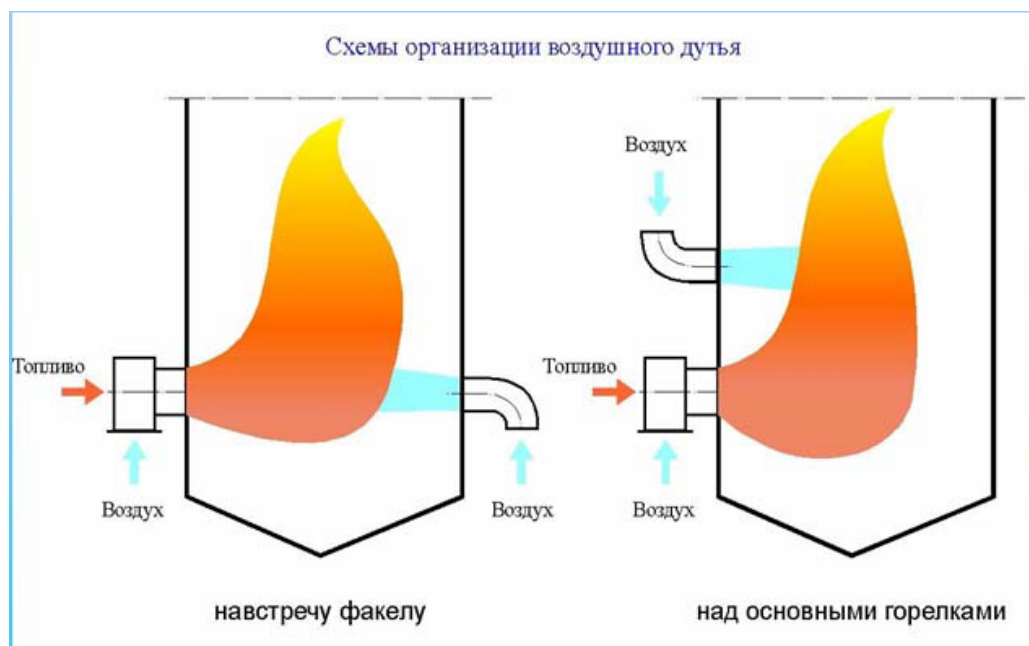


Рис. 2. Схемы организации воздушного дутья при ступенчатом сжигании

Такой ступенчатый подвод окислителя приводит к значительному снижению эмиссии  $\text{NO}_x$ . Одновременно, благодаря такому ступенчатому подводу воздуха, оксид углерода, образовавшийся в области нестехиометрического горения, окисляется до диоксида, тем самым снижая потери с химическим недожогом. Для снижения эмиссии оксидов азота оптимальный коэффициент избытка воздуха в зоне активного горения должен поддерживаться на минимально возможном уровне с тем, чтобы не благоприятствовать окислению топливного азота. Снижение коэффициента избытка воздуха не должно, однако, приводить к излишнему росту концентрации оксида углерода и других продуктов химического недожога в дымовых газах.

Одним из перспективных направлений в области снижения эмиссии оксидов азота по праву считается применение специальных конструкций горелок, обеспечивающих торможение процесса образования  $\text{NO}_x$ .

Применение специальных конструкций горелок позволяет осуществить со сравнительно небольшими затратами (известно, что стоимость горелок не

превышает 2 % от суммарной стоимости котла) комплекс технических решений, обеспечивающих торможение процесса образования оксидов азота и интенсификацию восстановительных реакций, в результате чего можно достичь заметного снижения выбросов оксидов азота.

Для снижения образования оксидов азота (при условии сохранения нормальной эксплуатации котла) конструкция горелки должна:

- затормозить в корне факела подмешивание богатого кислородом вторичного воздуха к воспламенившейся аэросмеси;
- интенсифицировать тепло- и массообмен между струей аэросмеси и высокотемпературными топочными газами, содержащими мало кислорода, а также между вторичным воздухом и топочными газами;
- обеспечить эффективное сжигание топлива при минимально возможной доле первичного воздуха;
- снизить пик температур в ядре горения без ущерба для стабильности воспламенения и эффективности выгорания топлива.

Отличительной чертой такой горелки является ступенчатый подвод вторичного воздуха по двум осесимметричным каналам, что позволяет регулировать процессы смесеобразования и горения. Внешний кольцевой канал для подвода вторичного воздуха разделяется на два кольцевых канала, причем суммарная площадь сечения двух кольцевых каналов для подвода вторичного и третичного воздуха превышает первоначальное сечение канала вторичного воздуха. Это приводит к снижению скорости потока и, как следствие, к уменьшению коэффициента турбулентного обмена, что также замедляет скорость смесеобразования. Таким образом, осуществляется ступенчатый подвод окислителя, и на начальном участке формирования факела создаются условия нестехиометрического горения, т. е. пониженное содержание кислорода. Оставшийся необходимый для полного горения воздух подается по третичному кольцевому каналу, несколько отдаленному к периферии от оси горелки, окружает «богатую» смесь, обеспечивая полное догорание топлива.

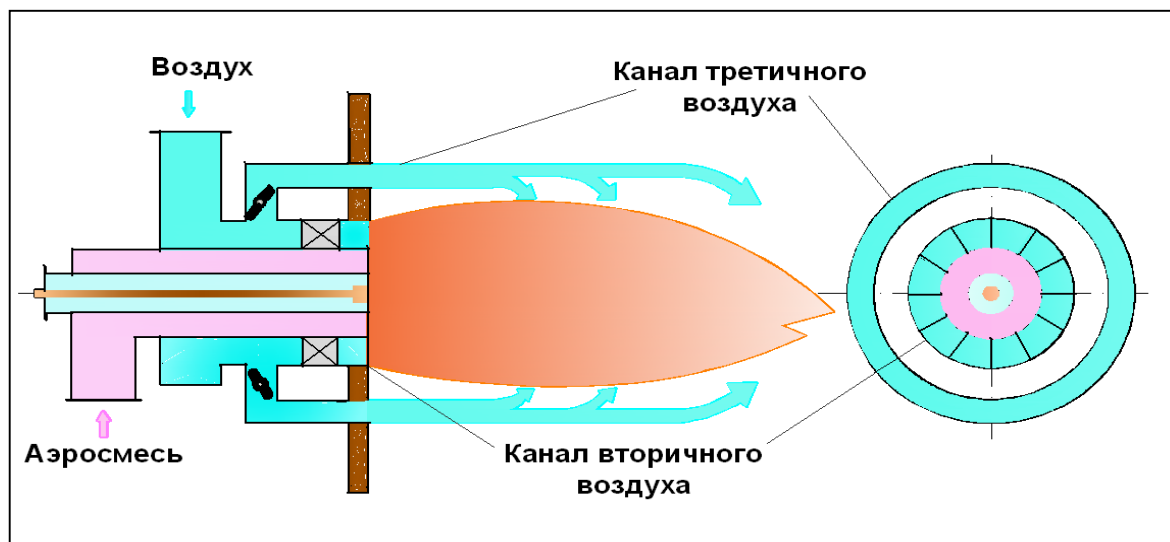


Рис. 3. Горелка с затянутым смесеобразованием



Также стоит отметить, что самыми эффективными способами из вышеописанных являются:

Для снижения максимальной температуры:

- рециркуляция дымовых газов;
- низкотемпературное сжигание;
- установка двусветных экранов.

Для снижения концентрации окислителя:

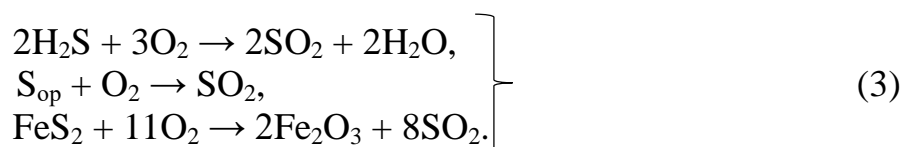
- снижение коэффициента избытка воздуха;
- нестехиометрическое сжигание;
- ступенчатое сжигание.

## 2.9. Образование оксидов серы при горении органических топлив

Содержащаяся в топливе сера является источником образования оксидов серы  $SO_x$ : сернистого  $SO_2$  и серного  $SO_3$  ангидридов. Суммарный массовый выброс  $SO_x$  зависит только от содержания серы в топливе  $S^p$ .

Сера  $S$  в твердых топливах может содержаться в трех видах: органическая  $S_{ор}$ , колчеданная  $S_k$  и сульфатная  $S_c$ . Органическая сера входит в состав сложных высокомолекулярных органических соединений топлива. Колчеданная сера представляет собой ее соединения с металлами (чаще железный колчедан  $FeS_2$ ) и входит в минеральную часть топлива. Сульфатная сера входит в минеральную часть топлива в виде сульфатов щелочных металлов ( $CaSO_4$  и  $MgSO_4$ ) и поэтому в процессе горения дальнейшему окислению не подвергается – не горит и переходит в золу. В конечном итоге состав серы имеет следующий вид:  $S_{общая} = S_{ор} + S_k + S_c$ .

В состав газообразных топлив сера входит только в виде сероводорода  $H_2S$  или сернистого ангидрида  $SO_2$ . Сера в мазуте входит главным образом в состав сероорганических соединений (меркаптаны, тиофен, органические сульфиды и полисульфиды) и в меньшей степени она присутствует в виде сероводорода  $H_2S$  и серы элементарной. Реакции окисления серы представлены ниже:



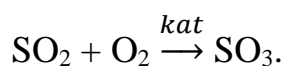
Часть  $SO_2$  (1–5 %) затем окисляется до серного ангидрида  $SO_3$  в ходе гомогенных реакций непосредственно при горении топлива:



где  $M$  – любая частица или молекула;

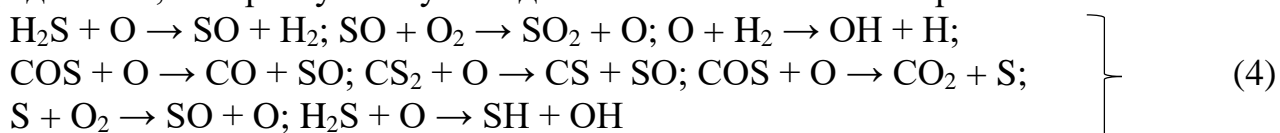


а также в результате протекания гетерогенных реакций окисления  $SO_2$  на поверхностях нагрева с участием катализаторов, которыми могут быть  $V_2O_5$ ,  $Fe_2O_3$ :



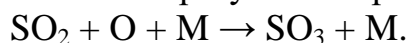
Как правило, доля  $\text{SO}_2$  в продуктах сгорания составляет 97–99 %, а доля  $\text{SO}_3$  – 1–3 % от суммарного выхода  $\text{SO}_x$ . Фактическое содержание  $\text{SO}_2$  в уходящих из котлов газах колеблется от 0,08 до 0,6 % об., а концентрация  $\text{SO}_3$  – от 0,0001 до 0,008 % об. Величины выбросов оксидов серы могут колебаться в широких пределах, в зависимости от содержания серы в ископаемом топливе, в частности в углях разных месторождений.

Для дымовых газов, образующихся при сжигании твердого и жидкого топлив, характерно присутствие следующих оксидов серы: ди- и триоксида серы. Образование этих оксидов обусловлено содержанием серы в сжигаемом топливе; при этом преобладающим компонентом является диоксид серы ( $\text{SO}_2$ ) – на его долю приходится 95–98 % от всего количества оксидов серы. При сжигании твердого и жидкого топлива образуется около 70 % от общего количества диоксида серы ( $\text{SO}_2$ ), поступающего в атмосферу во всем мире. Сера в углях находится в виде неорганических и органических соединений (среднее соотношение – 2:1); неорганическая сера присутствует в основном в виде дисульфидов и сульфатов, органическая сера связана с углеводородной матрицей угля и находится в виде сульфидов и производных тиофена. В мазуте сера содержится в основном в виде меркаптанов, органических сульфидов и полисульфидов, тиофена. При нагревании топлива происходит испарение органических и в меньшей степени неорганических соединений с образованием сероводорода,  $\text{CS}_2$ ,  $\text{COS}$ , производных тиофена, тиолов и органических сульфидов. Основными стадиями является образование и гидроксильных радикалов, которые участвуют в дальнейшем окислении серы:

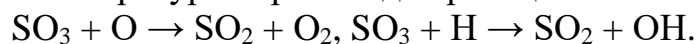


Из представленных реакций следует, что кроме  $\text{SO}_2$  при окислении сероводорода в продуктах сгорания могут присутствовать меркаптаны,  $\text{CS}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{COS}$  и др.

Триоксид серы при сжигании образуется по реакции:



При высоких температурах происходит реакции:



Низкое содержание  $\text{SO}_3$  в дымовых газах связано с соотношением скоростей образования и расходования его по приведенным реакциям.

В дымовых газах от сжигания топлив концентрация  $\text{SO}_2$  составляет обычно 1–2 г/м<sup>3</sup> и увеличивается с повышением температуры; при этом концентрация  $\text{SO}_3$  уменьшается. Считается, что концентрация оксидов серы в дымовых газах от сжигания газообразного топлива минимальна и при разработке нормативов ПДВ не рассматривается. Выход  $\text{SO}_2$  при сжигании твердого топлива составляет 8,5–68 кг/т, жидкого – 3,26–47,10 кг/т. Степень образования оксидов серы при сжигании твердого топлива представлена в табл. 1.

Таблица 1 – Степень образования оксидов серы при сжигании твердого топлива

Вещество	$\alpha$ (коэффициент избытка воздуха)	Концентрация примесей (мг/м <sup>3</sup> ) при температуре (°C)				
		800	850	900	950	1000
SO <sub>2</sub>	1,5	2010	2210	2281	2358	2393
	1,1	2880	3040	3140	3202	3254
	1,3	2360	2530	2631	2703	2752
SO <sub>3</sub>	1,1	574	371	248	169	118
	1,3	618	407	272	187	130

В процессе сжигания топлива сера переходит не только в дымовые газы в виде SO<sub>x</sub>, но может отчасти связываться твердыми продуктами сгорания: золой и шлаком при сжигании угля, коксом и золовыми отложениями при сжигании мазута. Поэтому концентрации SO<sub>x</sub> в газах по длине газового тракта могут изменяться.

Оксиды серы являются одними из основных загрязнителей атмосферы. Негативное воздействие серосодержащих выбросов на окружающую среду обусловлено тем, что высокие концентрации SO<sub>2</sub> вызывают серьезное повреждение растительности, например, появление белых пятен, обесцвечивание хлорофилла в листьях, замедление роста растений. Особенно чувствительны к SO<sub>2</sub> лишайники, которые используются как биоиндикаторы при определении избыточных количеств диоксида серы в воздухе.

SO<sub>x</sub> – это бесцветный газ, обладает резким специфическим запахом, чем-то напоминающий запах горелой спички.

ПДК сернистого газа – это предельная концентрация диоксида серы. Максимально допустимая разовая доля газа в воздухе должна составлять не более 0,5 мг/м<sup>3</sup>. Среднесуточное значение составляет 0,05 мг/м<sup>3</sup>. Допустимая норма для рабочей зоны (помещения) не должна превышать 10 мг/м<sup>3</sup>.

## 2.10. Очистка дымовых газов от оксидов серы

Благодаря переводу многих ТЭС на сжигание природного газа, выбросы SO<sub>2</sub> предприятиями электроэнергетики за последние 10 лет существенно сократились, особенно в Европейской части России. Проблема сероочистки дымовых газов ТЭС имеет приоритетное значение для некоторых

высокосернистых углей (интинского, подмосковного, донецкого, челябинского) и мазутных ТЭС.

Существует большое разнообразие теоретически обоснованных способов очистки дымовых газов от диоксида серы, однако широкое практическое применение нашли только экономически выгодные и технологически несложные процессы.

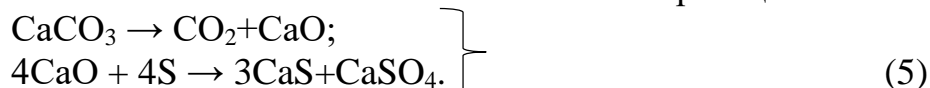
Сокращение выбросов диоксида серы (SO<sub>2</sub>) осуществляется в двух направлениях:

1 – предварительная обработка топлив с целью извлечения из них серы на специализированных предприятиях или непосредственно на ТЭС;

2 – связывание серы в процессе сжигания топлива.

Первое направление обычно применяется для обессеривания мазута, который подвергается при этом каталитической гидрообработке при температуре 633–693 К и давлении 40,0–10,0 МПа. В качестве катализатора используют сульфиды кобальта, никеля, молибдена, нанесенные на оксидоалюминиевую основу. На поверхности катализатора происходит взаимодействие водорода и серы с образованием сероводорода, который отделяется от водорода и утилизируется в виде серосодержащего раствора, чистой серы.

Стоимость обессеренного мазута во многом определяется стоимостью водорода, продолжительностью активного действия катализатора. Снижение цен на жидкое топливо не стимулирует развитие этого способа. Второе направление снижения выбросов заключается в новой технологии сжигания жидкого и твердого топлива, в частности, в кипящем слое твердых частиц (CaCO<sub>3</sub>, CaO), в который погружены поверхности нагрева котлоагрегата. Химизм процесса заключается в том, что в топке происходит термическая диссоциация известняка и окислительно-восстановительная реакция:



Взаимодействие CaS и CaSO<sub>4</sub> в регенераторе при T = 1373K приводит к образованию концентрированного SO<sub>2</sub>:



Оксид кальция возвращается в топку, а поток газов, содержащий SO<sub>2</sub> (10 % об.), удовлетворяет требованиям к сырью для производства серной кислоты и серы. Реализация способа возможна на предприятиях, расположенных вблизи комбинатов по производству серной кислоты.

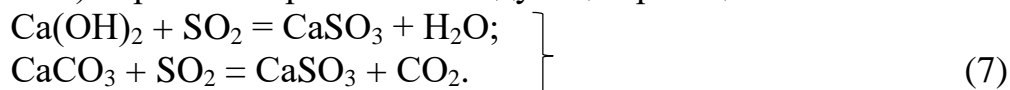
Возможны и другие способы сокращения выбросов SO<sub>2</sub>, например, по способу LIFAC и др. Согласно способу фирмы «LIFAC» при сжигании твердого топлива в зону выше вторичного дутья подается измельченный известняк или оксид кальция (фракция 30–40 мкм); при этом происходит связывание диоксида серы с образованием сульфита и сульфата (в меньшей степени) кальция. Эффективность такого мероприятия составляет около 40–50 %. Для обеспечения более высокой эффективности (70–80 %) дымовые газы обрабатываются в реакторе (полном абсорбере) водой при температуре в реакторе не ниже 403–423 К; вода подается в минимальном количестве,

соответствующем практически стехиометрическому соотношению для реакции:  $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} = \text{Ca}(\text{OH})_2$ . Образующийся гидроксид кальция мгновенно реагирует с растворенным диоксидом серы с образованием сульфита кальция. В связи с тем, что процесс проводится при температуре выше 373 К объем сточных вод минимален и обусловлен, в основном, подачей избыточного количества воды в реактор.

Аналогично можно рассмотреть, исходя из механизма образования, способы сокращения выбросов в атмосферу сероводорода, формальдегида, монооксида углерода и т. д.

### **Известковый метод нейтрализации серы**

Данный способ очистки основан на нейтрализации сернистой кислоты, получающейся в результате растворения  $\text{SO}_2$ , содержащегося в дымовых газах, щелочными реагентами: гидроксидом кальция (известью) или карбонатом кальция (известняком). При этом протекают следующие реакции:



В результате этих реакций получается сульфит кальция, частично окисляющийся в сульфат, возможна его переработка на строительные материалы, а также использование в сульфитцеллюлозном бумажном производстве. На практике применяются известняки, мел, доломиты, мергели (осадочные породы глинисто-карбонатного состава). Известь получают обжигом карбонатных пород при температуре 1100–1300 °С.

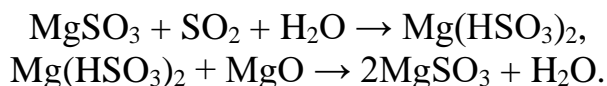
Достоинством метода является простая технологическая схема, низкие эксплуатационные затраты, доступность и дешевизна сорбента, возможность очистки газа без предварительного охлаждения и обеспыливания. Известковый способ обеспечивает улавливание  $\text{SO}_2$  не менее чем на 85 %.

### **Магnezитовый метод нейтрализации серы**

При очистке по магнезитовому способу дымовые газы поступают в абсорбер типа трубы Вентури, где орошаются суспензией, содержащей оксид магния. При этом происходит химическая реакция:



Полученный сульфит магния снова взаимодействует с диоксидом серы и водой, образуя бисульфит магния, который затем нейтрализуется добавлением магнезита:



Сульфит магния обжигают при температуре 800–900 °С, получая исходные продукты:



Оксид магния возвращают в процесс, а концентрированный  $\text{SO}_2$  может быть переработан в серную кислоту или элементарную серу. Степень очистки

газов от SO<sub>2</sub> составляет 90–92 %, причем предварительное охлаждение газов не требуется, в этом заключается основное достоинство магнезитового метода. К недостаткам относится наличие многочисленных операций с твердыми веществами, которые приводят к абразивному износу аппаратуры, и большой расход тепловой энергии на разложение сульфита магния. Способ не нашел широкого применения.

### **Аммиачно-циклический метод нейтрализации серы**

Аммиачно-циклический способ очистки дымовых газов от SO<sub>2</sub> основан на поглощении SO<sub>2</sub> из дымовых газов распыленным раствором сульфита аммония (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> с образованием бисульфита аммония по реакции:

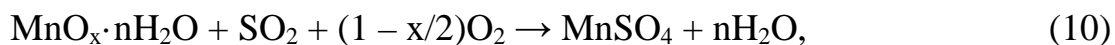


Полученный сульфит-бисульфит аммония подается в регенератор, где подвергается нагреванию до кипения, вследствие чего реакция смещается влево с выделением SO<sub>2</sub> и сульфита аммония, при этом получают сжиженный 100 %-ный сернистый ангидрид. После охлаждения раствор подается повторно для улавливания SO<sub>2</sub>. Главным недостатком аммиачно-циклического способа является необходимость глубокого охлаждения дымовых газов (до 30–35 °С) перед абсорбцией серы. Кроме того, все оборудование должно иметь кислотостойкое исполнение. Данный способ находится в стадии освоения.

### **Сухие методы очистки газов от серы**

Сухие методы сероочистки основаны на адсорбции диоксида серы твердыми сорбентами: оксидами алюминия, марганца, железа, активированным углем. Среди исследованных и опробованных способов некоторую практическую реализацию получил окисно-марганцевый метод (метод фирмы «Мицубиси»).

Тонко размолотый оксид марганца в виде порошка подается в горячие дымовые газы (~ 135 °С), где реагирует с SO<sub>2</sub> с образованием сульфата марганца:



где  $x = 1,6 - 1,7$ .

Часть выделенного в пылеуловителях сорбента возвращается на очистку дымовых газов, другая – на регенерацию:



Образующийся при регенерации сульфат аммония может быть использован как удобрение. Степень очистки от SO<sub>2</sub> составляет около 90 %.

Сухие процессы очистки дымовых газов от диоксида серы обеспечивают возможность реализации обработки газов при повышенных температурах без увлажнения очищаемых потоков, что позволяет снизить коррозию аппаратуры, упрощает технологию газоочистки и сокращает капитальные затраты на нее. Наряду с этим они обычно предусматривают возможность циклического использования поглотителя и (или) утилизацию продуктов процесса очистки газов.

## **Абсорбционно-каталитический метод нейтрализации серы**

В Иркутском государственном техническом университете был разработан новый абсорбционно-каталитический способ очистки газов от  $\text{SO}_2$ , в котором объединяются преимущества абсорбционного и каталитического способов. Сущность метода заключается в том, что очищаемый газ пропускают через двухфазную систему вода-катализатор. Содержащийся в нем диоксид серы поглощается водой и на катализаторе превращается в серную кислоту, окисляясь до  $\text{SO}_3$  кислородом, содержащимся в газе, рН водной фазы после абсорбционно-каталитической очистки составляет 2–2,7. Процесс протекает при низкой температуре (20–90 °С). Катализатор представляет собой активные комплексные соединения металлов переменной валентности (Fe, Mn, Co, Ni), нанесенные на полиэтиленовый носитель в виде гранул. Такой гетерогенный катализатор нового типа обладает рядом преимуществ: высокой каталитической активностью в широком диапазоне концентраций  $\text{SO}_2$ , высокой механической прочностью на истирание, химической стойкостью, стабильностью работы в течение 3–5 лет. Эффективность очистки от  $\text{SO}_2$  в экспериментальных условиях достигала 99 %.

## **Абсорбционная очистка газов**

Абсорбционные методы удаления  $\text{SO}_2$  совместно с  $\text{NO}_x$  из-за низкой химической активности оксида азота включают те или иные стадии окисления или восстановления. Степень очистки в комплексных методах обычно составляет 90 % от  $\text{SO}_2$  и 70–90 % от  $\text{NO}_x$ . Одновременная очистка может проводиться щелочными растворами. При абсорбции растворами  $\text{NaOH}$  и  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  в качестве побочных продуктов образуются  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{NaCl}$ ,  $\text{NaNO}_3$ ,  $\text{NaNO}_2$ , а при абсорбции  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  –  $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ .

Окисление  $\text{NO}$  может быть проведено в жидкой фазе с использованием катализаторов, например, этилендиаминтетрауксусной кислоты (ЭДТК) с добавками соединений двухвалентного железа, которые вводят в раствор гидроксида натрия или сульфита натрия.

Фирмой «Chisso Engineering» разработан метод очистки газов, образующихся при сжигании высокосернистых топлив, с получением сульфата аммония.

Топочные газы сначала очищают от пыли и хлоридов в скруббере, орошаемом водой. После этого газ подают в тарельчатый скруббер, орошаемый циркулирующей аммонизированной жидкостью, в состав которой входят ионы железа и ЭДТК. При контактировании жидкости поглощается 70–85 %  $\text{NO}_x$  и 90 %  $\text{SO}_2$ . Часть жидкости после скруббера отводят на окисление, которое проводят, барботируя через раствор бисульфата аммония атмосферный воздух. Продукты реакции подкисляют серной кислотой до рН = 0,5, затем охлаждают в холодильнике до 0 – (– 10) °С, что позволяет кристаллизовать 90 % ЭДТК. Ее отделяют от раствора в центрифуге и возвращают в скруббер. Содержащийся в маточной жидкости имидодисульфат аммония и дитионат разлагают при

нагревании до 120–130 °С и при давлении 0,3 МПа до сульфата аммония. Выделяющийся диоксид серы направляют в основной скруббер. Затем жидкость нейтрализуют аммиаком, концентрируют, освобождают от соединений железа и направляют на кристаллизацию сульфата аммония. Сульфат аммония может быть использован в качестве удобрения.

### **Образование золы и шлака при горении твердых топлив**

Зола и шлак образуются в результате термохимических превращений неорганической части топлива и различаются по химико-минералогическому составу и физико-механическим свойствам в зависимости от вида топлива и условий его сжигания. Зола и шлак отводятся от системы сжигания топлива различными способами. Зола улавливается в золоуловителях – сухих и мокрых. Для удаления шлака из бункеров котлоагрегатов используют шлакоудаляющие устройства разных конструкций с шнековой и скребковой подачей или шламосмывные устройства с периодическим или непрерывным смывом с помощью высоконапорных насадок. Иногда в системе золошлакоудаления применяют дробление шлака с помощью дробилок, чтобы лучше транспортировать его гидравлически. В настоящее время основным способом золошлакоудаления является гидравлический; пневматические системы для этой цели применяются редко.

Основу минерального вещества топлива представляет каолинит –  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , который при температуре 723–923 К разлагается с образованием  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$  – метакаолинита. При температуре 1173 К и выше образуется фаза муллита –  $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ . В диапазоне температур 873–1273 К имеет место разложения карбонатов (кальция, магния, железа, окисление пирита с образованием оксидов железа и серы происходит при температуре 673–973 К. В зоне температур 1473 К и выше появляется стекловидная фаза.

Большая часть минерального вещества топлива содержится в золе, меньшая в шлаке. Зола большинства топлив на 98–99 % состоит из свободных и связанных оксидов **Si, Al, Fe, Ca, Mg, K, Na, Ti, S**, а также микроэлементов – **B, Mo, Ge, Ga, U, As, W, Hg, Zn, Pb, Ni, Co, F** и др. Различают золы основные (содержание свободного CaO – до 50–60 %) и кислые (содержание общего CaO менее 10 %, кислых оксидов не менее 70–80 %).

Фракции золошлаковых материалов (ЗШМ) различают по составу. Во фракциях 15–20 мкм и менее преобладают **SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O, SO<sub>2</sub>**. Более крупные карбонаты преобладают в крупных фракциях. Фракции одной и той же золы представлены, как правило, одним набором минералов, но относительное содержание их в разных фракциях существенно отличается.

Минералы типа двухкальциевого силиката и многокальциевого алюмината распределяется равномерно. Содержание CaO в крупной фракции больше, чем в мелкой.

По зерновому составу ЗШМ принято разделять на золу и шлаки. Условной границей между ними принимается фракция 0,25 мм: более мелкие отходы относятся к золам, более крупные – к шлакам.



Основные показатели, характеризующие свойства ЗШМ и позволяющие оценить возможность их полезного использования, изменяются в широких пределах: пористость – 0,5–35 %, плотность – 1,6–3,4 г/см<sup>3</sup>. Нестабильность отмеченных параметров, а также химического состава ЗШМ, их недостаточная изученность как сырьевого материала является одной из причин ограниченного использования в промышленности ЗШМ.

При установлении степени пригодности ЗШМ в качестве сырья или добавки к нему в производстве стройматериалов прежде всего исходят из содержания кальция в составе минералогических фаз. В зависимости от содержания свободного и общего СаО ЗШМ разделяют на три группы. К первой группе относятся активные ЗШМ с общим содержанием СаО в пределах 20–60 % и свободного СаО до 30 %. Такие ЗШМ обладают свойством самостоятельного твердения и обеспечивают высокие значения модуля основности, силикатного модуля и коэффициента качества. Их используют при строительстве дамб, как местное вяжущее, при изготовлении изделий автоклавного твердения. Ко второй группе относятся скрытоактивные ЗШМ с общим содержанием СаО от 5 до 20 %. Содержание свободного СаО не превышает 2 %, а модуль основности – не более 0,5.

Основное направление утилизации таких ЗШМ – производство изделий, твердеющих при тепловой обработке с активизаторами. К третьей группе относятся ЗШМ, характеризующиеся высоким содержанием оксидов кремния и алюминия и низким (до 1 %) содержанием оксидов кальция и магния. В связи с этим такие инертные ЗШМ используют в дорожном строительстве, производстве кирпича, зольного гравия.

При оценке ЗШМ важно учитывать также содержание в них серы; возможные пределы содержания серы в единицах SO<sub>3</sub> следующие: первая группа – 0,5–12,5 %; вторая группа – 0,5–3,5 %; третья группа – 0,5–2,5 %.

Основными направлениями утилизации ЗШМ являются: производство цемента, кирпича, ячеистого бетона, легких блоков, теплоизоляционной засыпки, строительство дамб, золошлакоотвалов ТЭС и дорог, производство химических удобрений и применение для известкования кислых почв. Ежегодный выход ЗШМ составляет (22–50) 10<sup>6</sup> т; уровень утилизации ЗШМ в последние 10 лет изменялся с 3 % до 14 % от годового выхода ЗШМ. Следует отметить, что к настоящему времени разработано с использованием ЗШМ более 100 технологий изготовления различных бетонов, более 40 технологий производства кирпича, более 50 технологий фракционирования ЗШМ и придания им товарных кондиций. Производство бетонов и растворов может потреблять около 30–106 т ЗШМ. За счет использования золы на кирпичных заводах экономится до 20 % топлива, без снижения качества продукции.

Себестоимость получения редких металлов из зол на 60 % ниже, чем из руд. За счет применения ЗШМ в производстве цемента можно сократить расход топлива в цементной промышленности на 20–30 % (или увеличить производство цемента на 20–30 %, не повышая расход топлива).

В настоящее время основным способом обращения с ЗШМ является удаление их из котлоагрегатов специальными шлакоудаляющими

устройствами, охлаждение и транспортировка (обычно гидравлическим способом) в золошлакоотвал (ЗШО). Состав и свойства шлака, так же как и золы, зависят от месторождения и марки угля, условий его сжигания и устанавливается экспериментально или из справочной литературы.

В соответствии с нормативными документами золошлакоотвалы для приема зол и шлаков, образующихся при сжигании твердых топлив, рассчитываются на накопление отходов в течение 5 лет (в отдельных случаях – до 10 лет). Однако при использовании твердого топлива как резервного этот срок может быть увеличен.

### **Технологические методы снижения образования золошлаковых отходов**

Фильтрация в современной промышленности используют для разделения газовых или жидких гетерогенных систем. Оно позволяет получить более полную, чем в процессах осаждения, очистку газа или жидкости от взвешенных частиц, а, следовательно, и более высокого выхода продукта (если этот продукт твердая фаза суспензии).

Большинство технологических процессов сопровождаются выделением некоторого количества пыли или иных твердых частиц. Чтобы окружающая атмосфера не загрязнялась промышленными выбросами нужно обязательно совершенствовать технологические процессы и сокращать вредные выделения до минимума, а также внедрять в производство замкнутые безотходные технологические процессы. Если же в силу каких-то обстоятельств решить эти задачи не представляется возможным, то следует использовать самые эффективные и экономичные средства очистки газов и воздуха перед их выбросом в окружающую атмосферу.

Для очистки промышленных газов от загрязнений (зола, пыль и другие твердые частицы) были созданы специальные высокоэффективные фильтры и установки. Принцип их работы основан на применении электростатического осаждения – одного из самых эффективных способов удаления твердых частиц из газа, а также качественной фильтрации посредством пористых слоев и перегородок, промывки газов и отделения частиц за счет воздействия гравитационных сил, то есть инерционной сепарации.

При фильтрации твердые частицы, содержащиеся в газе или жидкости, могут либо задерживаться на поверхности фильтровальной перегородки, образуя тем самым осадок, либо же могут проходить дальше – в глубину материала перегородки, задерживаясь в его порах.

Движущей силой процесса фильтрации является разность значений давления до фильтра и после него. Если это самая разность создается с помощью какого-либо из устройств – компрессора, насоса или вакуум-насоса, то получается фильтрация под действием перепада давления. Если же она создается с помощью центробежных сил, то происходит центробежное фильтрация (по-другому – центрифугирование).

Для очистки газа от пыли применяется фильтрация. То есть для фильтрации газов их пропускают через пористые перегородки, которые обладают свойством пропускать только частицы газа и задерживать твердые частицы.

При выборе пористой перегородки оцениваются такие факторы, как температура и химические свойства газа, а также размеры твердых частиц, от которых необходимо очистить газ.

Скорость фильтрации определяется, в первую очередь количеством газа, проходящим через фильтрующую перегородку за единицу времени. Помимо этого, скорость фильтрации зависит от сопротивления фильтрующей перегородки и давления газа.

### **Основные типы загрязнения, выделяющиеся в процессе горения**

Летучая зола – мелкие частицы несгораемого остатка, состоящие из минеральных примесей, которые были в исходном топливе. Количество золы в дымовых газах варьируется от типа топлива – в мазуте содержание, как правило, 0,05–0,15 %, в дровах от 0,5 % до 2 %, в каменном угле содержание золы варьируется от 1 до 50 %, в торфе от 3 до 30 %, а в горючих сланцах от 50 до 80 % золы. Чем больше процент содержания золы в топливе, тем больше золы образуется в процессе горения. Следовательно, от используемого типа топлива зависит и выбор очистительных систем для дымовых газов.

Оксиды серы ( $\text{SO}_2$ ) и азота ( $\text{NO}$  и  $\text{NO}_2$ ) – в воздухе соединяются с парами воды и в ходе фотохимической реакции образуют кислоту, которая оседает на землю в виде кислотных дождей.

Тяжелые металлы – группа элементов таблицы Менделеева, обладающие свойством токсичности. Стоит оговориться, что термин «тяжелые металлы» охватывает достаточно широкую группу элементов и используется, как правило, в контексте вредности для здоровья. С технической точки зрения, к тяжелым металлам причисляют элементы с плотностью выше плотности железа ( $8 \text{ г/см}^3$ ). На практике чаще всего термин «тяжелые металлы» применяется к свинцу, ртути и кадмию.

Необходимо отметить, что универсального метода очистки воздуха от дыма и прочих типов загрязнения не существует, поэтому приходится комбинировать методы для достижения максимального эффекта.

### **Способы очистки дымового газа от золы и твердых частиц**

В основе фильтрования заложено два основных способа очистки дымовых газов – сухое и мокрое золоулавливание.

К мокрой очистке относят скрубберы, а все остальное к сухой очистке дымовых газов.

Фильтрование:

- Рукавные тканевые фильтры
- Электростатические фильтры
- Циклоны
- Скрубберы

## Рукавные тканевые фильтры

Рукавные тканевые фильтры – представляют собой цилиндрические емкости, в которых расположены вертикально подвешенные тканевые мешки. Частицы золы в дымовом газе, проходя через ткань, застревают. Очищенный воздух выводится через трубу в верхней части емкости. Для очистки рукавов от золы их периодически встряхивают. Зола собирается в отстойнике. Рукавные тканевые фильтры для очистки воздуха от дыма улавливают до 99,9 % золы.

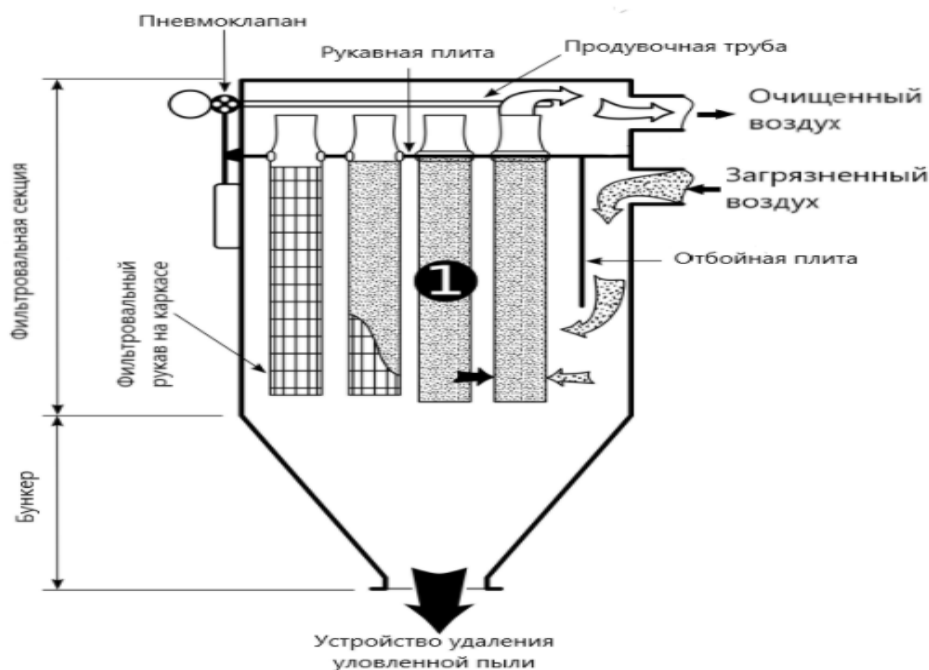


Рис. 4. Рукавный фильтр

Устройство рукавных фильтров их технические характеристики незначительно отличаются у разных производителей. Основные блоки и принципиальная схема конструкции состоит из следующих элементов:

1. Камера грязного газа.
2. Камера чистого газа.
3. Корпус рукавного фильтра.
4. Монтажная плита (разделительная плита между чистой и грязной камерой).
5. Фильтровальные рукава.
6. Система регенерации с ресиверами, пневмоклапанами, продувочными трубами.
7. Бункер с устройством выгрузки уловленной пыли и опорами.
8. Система автоматики управления.

Конфигурация фильтра отличается в зависимости от условий эксплуатации и может быть дополнена площадками обслуживания, системой

автоматической выгрузки бункера, пневмо- или вибросистемой сводообрушения бункера, системой аварийного подмеса наружного воздуха для снижения температуры. В случае расположения оборудования на улице, во избежание образования конденсата на корпусе, фильтр оснащается обогревом пневмоклапанов и бункера, а также, теплоизоляцией.

Для фильтрации взрывоопасной пыли, например при производстве муки, цемента, угольных предприятиях, фильтры изготавливаются во взрывозащищенном исполнении. Взрывозащищенное исполнение рукавного фильтра предполагает использование фильтровальных рукавов с антистатическим покрытием, что предотвращает образование статического заряда на поверхности фильтрующего материала. Также на корпусе фильтра устанавливаются взрыворазрывные мембраны, которые высвобождают избыточное давление в случае взрыва.

Фильтровальный материал рукавов подбирается исходя из особенностей фильтруемой среды, свойств и дисперсности пыли. Основные материалы, используемые в рукавных фильтрах: полиэстер (PE), мета-арамид (AR), полиимид (P84), стекловолокно (FG), политетрафторэтилен (PTFE), полиакрилонитрил (PAN), полифениленсульфид (PPS) и другие.

Принцип работы рукавных фильтров основан на прохождении грязного воздуха через поры нетканого фильтрующего материала. Запыленный воздух по газоходу через входной патрубок попадает в камеру грязного газа и проходит через поверхность фильтровальных рукавов. Пыль оседает на фильтрующем материале, а очищенный воздух попадает в камеру чистого газа и затем удаляется из фильтра. По мере накопления пыли на поверхности фильтрующего материала возрастает сопротивление движению воздуха и снижается пропускная способность фильтровальных рукавов. Для очистки рукавов от уловленной пыли осуществляется их регенерация сжатым воздухом или вибровстряхиванием, в зависимости от метода регенерации рукавного фильтра. Сброшенная с рукавов пыль попадает в бункер накопитель и через устройство выгрузки удаляется.

Рукавный фильтр нуждается в замене в случае, если наблюдается его полный износ или снижается эффективность регенерации. Если в стенках фильтра образовались сквозные отверстия, в этом случае замена выполняется раньше установленного времени. Когда же требуется полная замена узла, проводятся следующие действия:

- перекрываются входные и выходные заслонки отсека в случае, если того требует конфигурация устройства;
- через смотровой люк снимается продувочная труба, которая подведена к заменяемой части батареи;
- отсоединяется каркас рукава;
- рукав удаляется путем поднятия его по трубной решетке, либо опускания его в пылесборный бункер. В последнем варианте фильтр удаляется из отсека через смотровой люк;
- новый рукав монтируется в обратном порядке, после присоединения закрепляется каркас, подключается продувочная трубка, после выполненной

замены проводится пробный пуск устройства, чтобы проверить его исправность и функциональность.

Для замены фильтра лучше приглашать специализированную организацию, сотрудники которой имеют опыт проведения работ по обслуживанию рукавной системы фильтрации.

Благодаря универсальности своей конструкции, а также широкой опциональности рукавные фильтры имеют массу преимуществ и нашли широкое применение в различных отраслях. Одним из достоинств является то, что они легко встраиваются в технологическую линию, могут быть адаптированы под условия стесненных габаритов. Среди пылеуловителей сухого типа рукавные фильтры имеют наиболее высокую степень очистки – до 99 %. Имеют сравнительно низкие эксплуатационные затраты, которые ограничиваются регламентной заменой фильтрующих рукавов один раз в 2–3 года (данный срок зависит от агрессивности среды, температуры и влажности) и периодической заменой пневмоклапанов. Рукавные фильтры могут также эффективно функционировать в условиях суровой зимы с температурой наружного воздуха до -60 °С, как и в отапливаемом помещении, что можно отнести это к безусловным достоинствам.

При этом существуют и недостатки рукавных фильтров. Один из них – это необходимость подвода сжатого воздуха, к которому имеются особые требования. Например, для больших фильтров, обеспечивающих фильтрацию 150–200 тыс. м<sup>3</sup>/ч загрязненного газа, необходима подача сжатого воздуха в объеме 4000 л/мин. Для некоторых фильтров необходимо применение рукавов из мета-aramида, стекловолокна, полиимида и других дорогих материалов, от правильности подбора которых зависит срок их жизни. Ошибки в подборе фильтрующего материала влекут за собой значительное увеличение стоимости эксплуатации всего оборудования. Фильтровальный материал рукавов подбирается исходя из особенностей фильтруемой среды, свойств и дисперсности пыли. Основные материалы, используемые в рукавных фильтрах: полиэстер (PE), мета-арамид (AR), полиимид (P84), стекловолокно (FG), политетрафторэтилен (PTFE), полиакрилонитрил (PAN), полифениленсульфид (PPS) и другие.

## **Электрофильтры**

**Электростатические фильтры** – в таких устройствах поток загрязненного воздуха проходит через электрическое поле, после чего частицы оседают на электродах под действием электростатического поля обратной полярности.

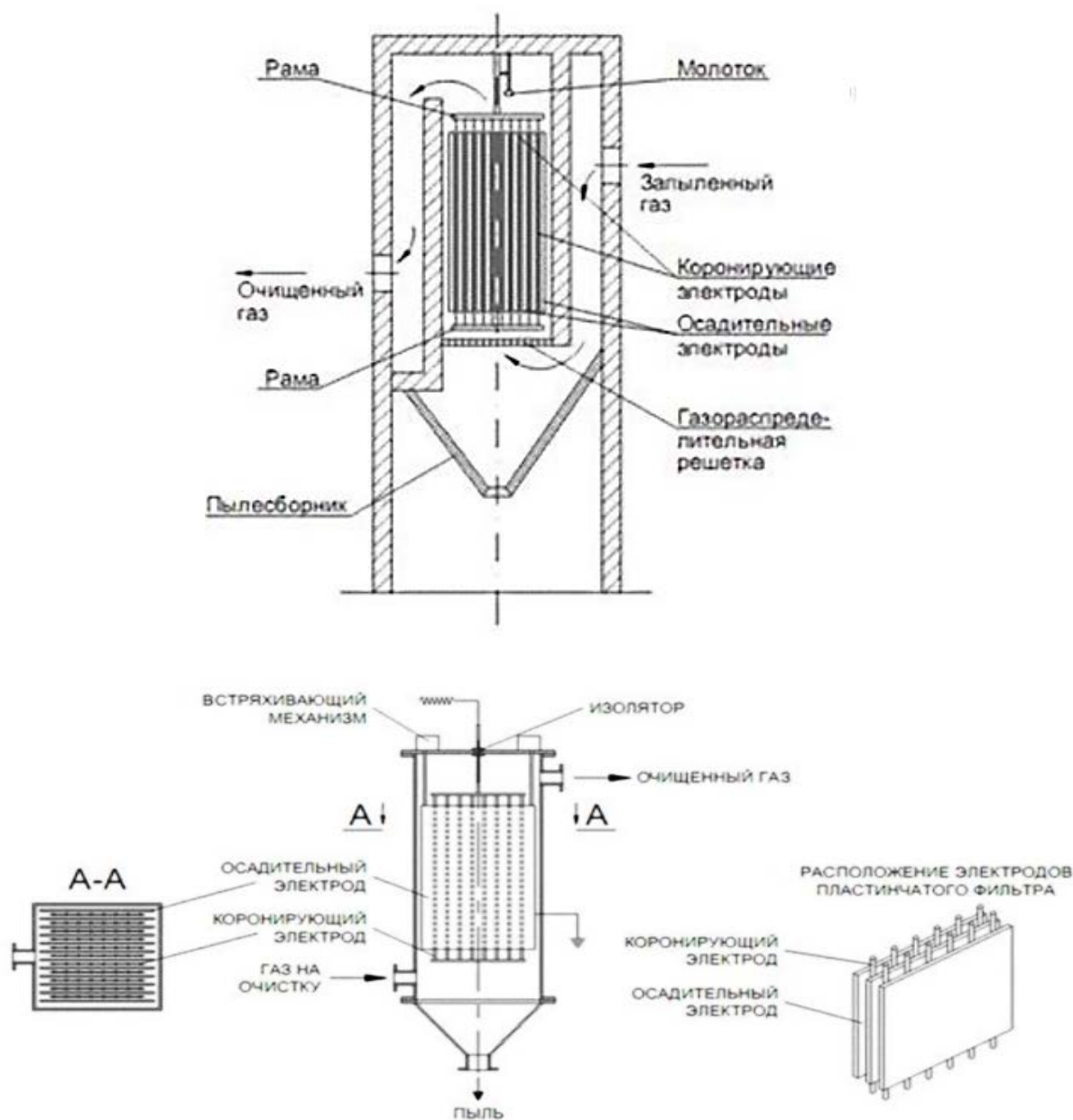


Рис. 5. Пластинчатый электрофильтр

На пластинчатые листовые электроды (принято называть термином «осадительные»), собранные в отдельные секции, и размещенные между ними металлические нити-сетки прикладываются потенциалы противоположных знаков от источника постоянного тока.

Величина напряжения между сеткой и пластинами в бытовых приборах составляет несколько киловольт. У фильтров, работающих на промышленных объектах, оно может быть увеличено на порядок.

Через эти электроды вентиляторами по специальным воздуховодам пропускается поток воздуха или газов, содержащий механические примеси и бактерии.

Под действием высокого напряжения формируется сильное электрическое поле и поверхностный коронный разряд, стекающий с нитей (коронирующих электродов). Он приводит к ионизации прилегающего к электродам воздуха с выделением анионов (+) и катионов (—), создается ионный ток.

Ионы с отрицательным зарядом под действием электростатического поля движутся к осадительным электродам, попутно заряжая встречные примеси. На эти заряды действуют электростатические силы, создающие скопление пыли на осадительных электродах. Таким способом происходит очищение прогоняемого сквозь фильтр воздуха.

При работе фильтра слой пыли на его электродах постоянно увеличивается. Его периодически необходимо удалять. У бытовых конструкций эта операция выполняется вручную. На мощных производственных установках осадительные и коронирующие электроды механически встряхивают для направления загрязнений в специальный бункер, откуда их забирают на утилизацию.

## Промышленные электрофильтры

### Особенности конструкций промышленного электростатического фильтра



Рис. 6. Конструкция промышленного электрофильтра



Детали его корпуса могут быть выполнены бетонными блоками или металлическими конструкциями.

На входе загрязненного и выходе очищенного воздуха устанавливаются газораспределительные экраны, которые оптимально направляют воздушные массы между электродами.

Сбор пыли происходит в бункерах, которые обычно создают с плоским днищем и оборудуют скребковым конвейером. Пылесборники изготавливают в форме:

- лотков;
- перевернутой пирамиды;
- усеченного конуса.

Механизмы встряхивания электродов работают по принципу падающего молотка. Они могут располагаться снизу или сверху пластин. Работа этих устройств значительно ускоряет очистку электродов. Лучших результатов достигают конструкции, в которых каждый молоток воздействует на свой электрод.

Для создания высоковольтного коронирующего разряда применяются стандартные трансформаторы с выпрямителями, работающие от сети промышленной частоты или специальные высокочастотные устройства в несколько десятков килогерц. Их работой занимаются микропроцессорные системы управления.

Среди различных типов коронирующих электродов лучше всего работают спирали из нержавеющей стали, создающие оптимальное натяжение нитей. Они меньше загрязняются, чем все остальные модели.

Конструкции осадительных электродов в виде пластин специального профиля объединяют в секции, создают для равномерного распределения поверхностных зарядов.

## **Промышленные фильтры для улавливания высокотоксичных аэрозолей**

У этих конструкций используется двухкаскадная зона очистки воздуха, загрязненного твердыми примесями или парами аэрозолей. Самые крупные частицы оседают на предварительном фильтре. Далее поток направляется в ионизатор с коронирующими проволочными и заземленными пластинчатыми электродами. От блока высокого напряжения на электроды подается порядка 12 киловольт. В результате происходит коронирующий разряд и зарядка частиц примесей. Продуваемая воздушная смесь проходит через осадитель, в котором вредные вещества концентрируются на заземленных пластинах. Расположенный после осадителя постфильтр улавливает остатки неосевших частиц. Химкассета дополнительно очищает воздух от оставшихся примесей углекислых и прочих газов. Осажденные на пластинах аэрозоли просто стекают вниз поддона под действием сил гравитации.

## Области применения промышленных электростатических фильтров

Очистка загрязненных воздушных сред используется на:

- электростанциях с котлами, сжигающими уголь;
- объектах мазутосжигающих производств;
- мусоросжигающих заводах;
- промышленных котлах химического восстановления;
- производственных печах отжига известняка;
- технологических котлах сжигания биомассы;
- предприятиях черной металлургии;
- производстве цветных металлов;
- объектах цементной промышленности;
- предприятиях переработки сельскохозяйственной продукции и других отраслях.

## Промышленные фильтры для улавливания высокотоксичных аэрозолей

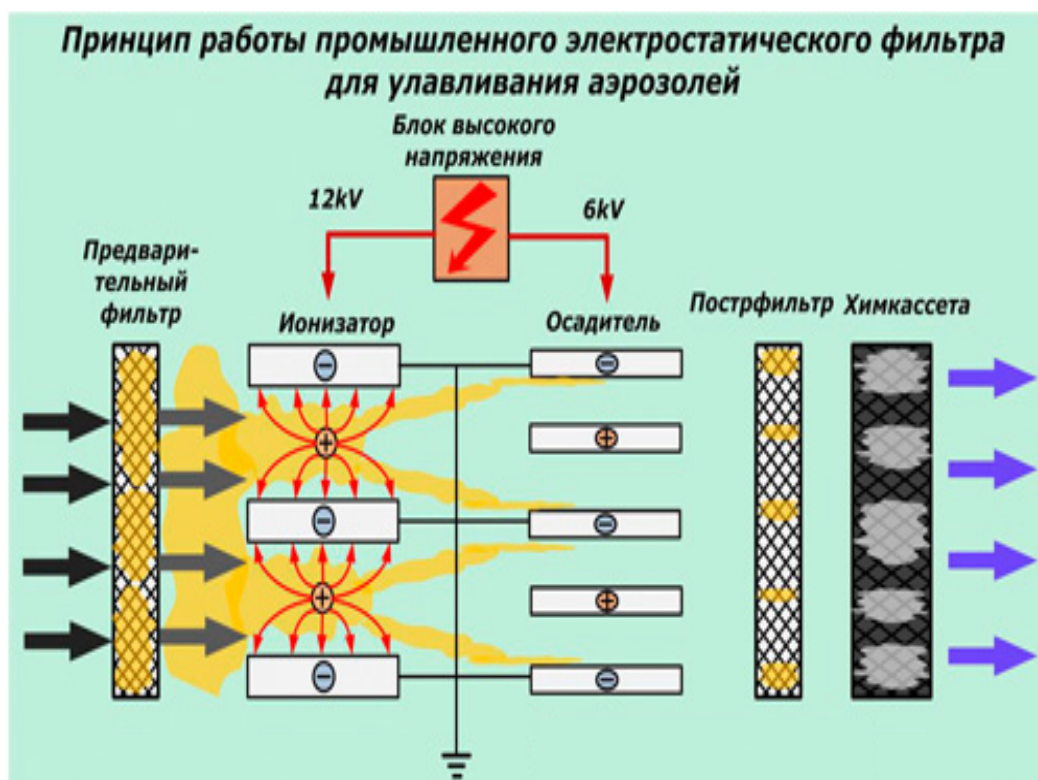


Рис. 7. Конструкция промышленного фильтра для улавливания высокотоксичных аэрозолей

**Аэрозоль** – образования из двух или большего числа различных тел, которые практически не смешиваются и не реагируют друг с другом химически, находящиеся во взвешенном состоянии в газовой среде. Под образованиями понимаются продукты сгорания топлив.

## Циклоны

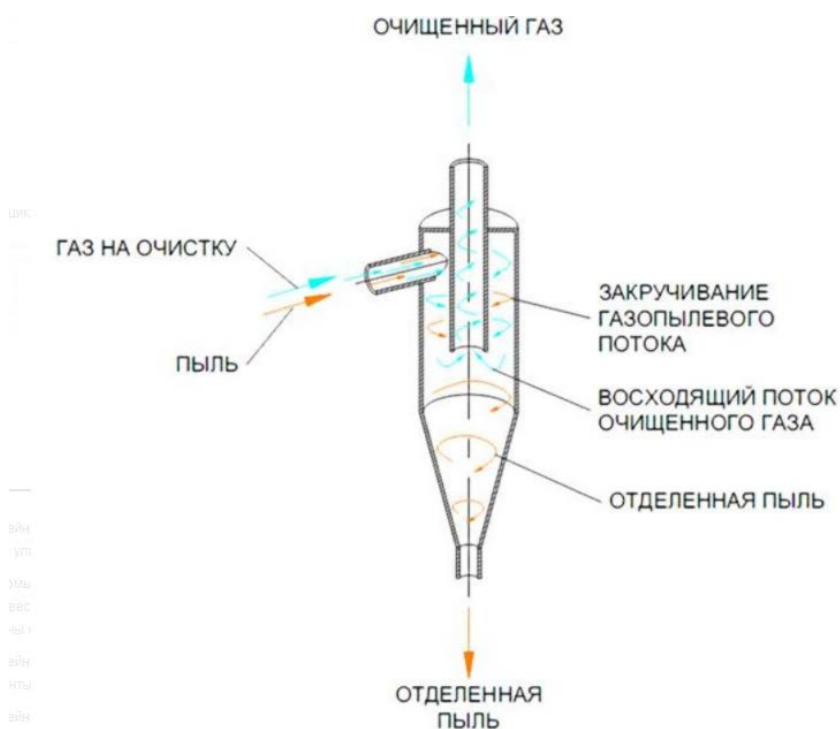


Рис. 8. Циклон

Циклоны обеспечивают более быструю и полную очистку газа за счет воздействия на него центробежной силы. Конструктивно циклон является резервуаром цилиндрической формы с коническим дном. Он также оснащен выхлопной трубой, которая расположена внутри цилиндрической части устройства. Газ подается в циклон посредством трубопровода, который направлен по касательной к цилиндру. Благодаря такой форме трубопровода, газ внутри цилиндра вращается вокруг выхлопной трубы, в результате чего развивается центробежная сила. Под ее воздействием твердые частицы с большей массой отбрасываются к периферии и остаются на стенках устройства, после чего высыпаются через его коническую часть. Очищенный газ выходит из циклона по выхлопной трубе, а твердые частицы, скопившиеся в конической части периодически удаляются посредством патрубка.

## Батарейный циклон

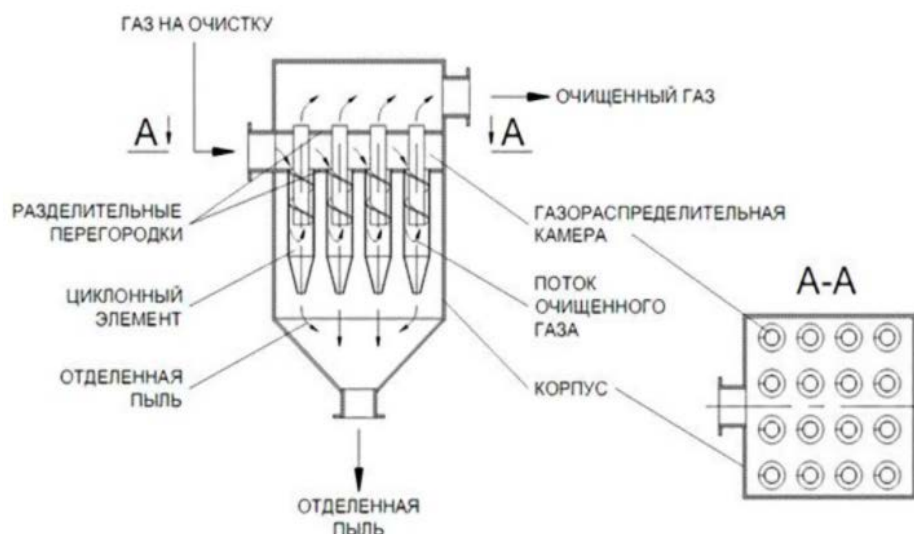


Рис. 9. Батарейный циклон

Батарейные циклоны представляют собой параллельно включенные циклоны малого диаметра (от 150 до 350 мм). Такие устройства лучше улавливают пыль, т. к. при малом радиусе циклона значительно возрастает центробежная сила.

На промышленных предприятиях используют две конструкции батарейных циклонов. В одном варианте конструкции для ввода газовой взвеси предусмотрена винтовая вставка «винт», в другом – неподвижное лопастное колесо «розетка». Эти циклоны способны частично улавливать твердые частицы размером 3 мкм.

Батарейные циклоны способны работать с переменной нагрузкой, т. е. при необходимости можно включать или выключать отдельные элементы батареи. Типичный элемент циклона, состоящий из корпуса и выхлопной трубы, представлен на рис 9.

Труба оснащена наружными винтовыми лопастями, которые передают потоку газа движение по спирали. В корпус газ подается сверху, затем проходит по поверхности винта в кольцевом пространстве (между внешней поверхностью трубы и внутренней поверхностью корпуса). Твердые частицы задерживаются на стенках корпуса, после чего осыпаются в нижнюю коническую часть и поступают в бункер батареи.

Элементы конструкции батарейного циклона расположены вертикально, параллельными рядами в корпусе прямоугольного сечения. Камера оснащена двумя решетками, в отверстия которых устанавливаются элементы. Очищаемый газ подается через патрубок в пространство между решетками и распределяется по отдельным элементам. После очищения газ поступает в пространство над верхней решеткой и выводится посредством бокового патрубка. Твердые частицы ссыпаются в коническое дно. Элементы конструкции батареи выполняются из

чугуна, а решетки из листовой стали. Такие устройства способны очищать газ при широком диапазоне температур (верхний передел 400°).

### **Газоочистное оборудование для мокрой очистки газов**

Мокрую очистку применяют в основном для очистки газов от частиц пыли или же тумана. Обычно промывной жидкостью является вода, однако иногда используют водные растворы серной кислоты, соды или иных веществ.

Газ и жидкость могут контактировать между собой поверхностью капель (скрубберы Вентури, полые скрубберы), поверхностью стекающей жидкой пленки (центробежные и насадочные скрубберы) и пузырьков газа (барботажные или по-другому, пенные пылеуловители).

Дисперсионные частицы соприкасаются с поверхностью жидкости под действием сил тяжести, инерции, ударов молекул и турбулентной пульсации, которые движут эти самые частицы.

Газ при мокром улавливании (кроме процесса очистки в скрубберах Вентури) эффективно очищается от частиц, размер которых составляет не менее 3–5 микрон. Более мелкие частицы улавливаются довольно плохо в силу двух основных причин. Во-первых, мельчайшие частицы, двигаясь вместе с потоком газа, огибают поверхность жидкости даже с ней не соприкасаясь. Во-вторых, рядом с мокрой поверхностью есть газовый пограничный слой, который мизерная частица часто попросту не может преодолеть. В таких установках, как скрубберы Вентури, где поток газа движется с большой скоростью, мелкие частицы в состоянии преодолеть этот ламинарный пограничный слой за счет сил инерции, которые возникают при разрушении вихрей. Поэтому такие устройства способны улавливать твердые частицы размером 1–2 микрон, а также, капли тумана, диаметр которых составляет 0,2 микрон.

Если частицы обладают таким свойством, как гидрофобность (способность не смачиваться жидкостью), то для эффективного их улавливания, у таких частиц должен быть дополнительный запас кинетической энергии, который позволит преодолеть им силы поверхностного натяжения.

Ранее, когда требовалась очистка от гидрофобных частиц, для того чтобы несколько улучшить их смачиваемость, в жидкость вводили специальные поверхностно-активные вещества. Однако при применении данного способа сточные воды, образующиеся при мокрой очистке, загрязнялись органическими веществами. Сегодня такой метод не отвечает установленным экологическим требованиям.

Стоит отметить, что мокрая очистка запыленных газов наиболее эффективна только тогда, когда увлажнение и охлаждение очищаемого от пыли газа вполне допустимы, а твердые частицы, которые требуется отделить, не представляют особой ценности. Охлаждение очищаемого газа до температуры, которая ниже температуры конденсации паров жидкости, содержащихся в этом газе, несколько увеличивает массу частиц, служащих своего рода центрами конденсации, что в значительной степени облегчает их улавливание. Помимо

этого, водяные пары способны конденсироваться еще и поверхности холодных капелек. При этом возникает движение молекул пара, которое помогает частицам пыли перемещаться к каплям. Мокрую очистку во многих случаях используют для того, чтобы выделить из газа частицы, которые имеют большую ценность.

При мокрой очистке газов образуется некоторое количество сточных вод, которые содержат дисперсионные частицы, уловленные из газа. Если эти частицы могут привести к загрязнению окружающей среды, то предусматривают их отделение от сточных вод в специальных отстойниках, либо же устройствах циклонного типа. После этого осветленная жидкость может опять использоваться для проведения мокрой очистки. Все это позволяет защищать окружающую среду от загрязнений и одновременно экономно использовать свежую воду, которой требуется для подпитки лишь то количество, что потерялось со шламами. Повторное применение осветленной жидкости делает рациональным отделение от жидкости дисперсионных частиц даже и в тех случаях, когда эти частицы для окружающей среды абсолютно безвредны.

Если при очищении газа допустимо его охлаждение и увлажнение, а твердые частицы, которые взвешены в газе не представляют значительной ценности, то может использоваться мокрая очистка газа. Такая очистка производится путем промывки газа водой или другой жидкостью.

При мокрой очистке газов их приводят в тесный контакт с жидкостью, которую распределяют в виде тонкой пленки, которая стекает, или же разбрызгивают. Фильтры, которые используются для мокрой очистки, работают на основе инертных сил. Это значит, что при ударе газов о стенки, которые смочены жидкостью, она поглощает частицы, которые взвешены в газе.

При воздействии инертных, а также центробежных сил взвешенные частицы, которые взвешены в газе, практически полностью извлекаются из газа, который при этом насыщается парами жидкости и охлаждается. Когда газ охлаждается ниже температуры конденсации паров жидкости, которые в нем находятся, то мельчайшие твердые частицы удаляются из газа максимально полно. Твердые частицы при этом играют роль центров конденсации.

Гидравлические пылеуловители, которые используются для мокрой очистки газов, могут иметь различные конструкции. Гидравлические пылеуловители можно разделить на такие типы:

- Динамические.
- Статические (как правило, это скрубберы).
- Пенные пылеуловители.
- Установки, которые имеют смоченную поверхность.

Самыми распространенными фильтрами для мокрой очистки газов являются скрубберы. Работа таких установок основана на разбрызгивании жидкостей в пространстве, которое заполнено газом.

Работа такого фильтра основана на прохождении газа через полый скруббер снизу вверх, и при этом орошается жидкостью, которая разбрызгивается через форсунки. Для того чтобы более качественно отмыть

пыли, используются насадочные скрубберы, которые, как правило, заполнены хордовой насадкой и орошаются из брызгал или других видов специальных распределительных устройств.

Полые скрубберы позволяют очистить газ до 60–75 %. Насадочные скрубберы при этом способны повысить чистоту газа до 75–85 %, причем запыленность промывного газа может быть не более 1–2 г/нм<sup>3</sup>.

## Скрубберы

**Скрубберы** – аппараты для мокрой очистки дымовых газов. Представляют из себя вертикальные емкости, внутри которых располагаются различные приспособления для мокрой очистки (форсунки для разбрызгивания воды, различные насадки, устройства для дробления воды газовым потоком). Дым промывается и очищается водой, вся сажа остается с водой, которая утекает в отстойник, очищенный же газ выводится в атмосферу через патрубок в верхней части скруббера.

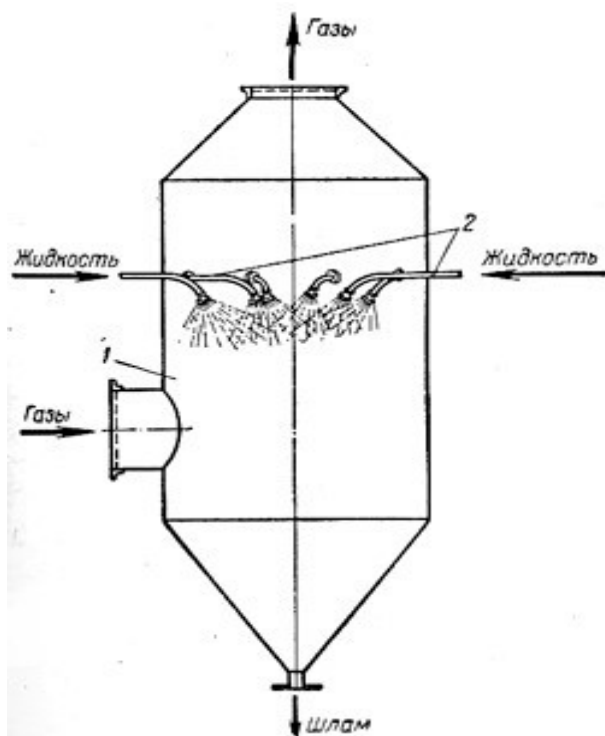


Рис. 10. Скруббер

Полые скрубберы, представляющие собой вертикальные колонны прямоугольного или круглого сечения, являются самыми простейшими установками/фильтрами для мокрой очистки газов и их одновременного охлаждения. Колонна данной установки орошается водой, которая разбрызгивается посредством форсунок. Запыленный газ может подаваться в устройство и снизу колонны и сверху. Если мокрая очистка применяется только для предварительной обработки запыленных газов для дальнейшей их очистки от

частиц пыли в рукавных фильтрах или сухих электрофильтрах, то подача сверху газа предпочтительнее. Это позволяет более равномерно распределить газ по сечению колонны и усилить процесс его охлаждения. Жидкость с уловленными частицами пыли выводится из днища конической формы снизу установки.

Если основной задачей полого скруббера является охлаждение газа, то расход жидкости в установке составляет, как правило, от 0,3 до 0,5 кубометров на одну тысячу кубических метров газа. Если же устройство используют главным образом для очистки газа от пыли, то расход жидкости обычно составляет в пределах от 3 до 10 кубометров на тысячу кубических метров газа.

Чем больше запыленность газа, размер частиц пыли и расход орошаемой жидкости, тем больше степень улавливания пыли (обычно она не превышает 70–85 %). Гидравлическое сопротивление таких фильтров, как полые скрубберы, относительно невелико и составляет, как правило, от 100 до 280 Па.

### Насадочный скруббер

**Насадочные газопромыватели** – колонны, заполненные насадками различной формы. Эти устройства рекомендуется применять только при улавливании хорошо смачиваемой пыли. Особенно, когда процессы улавливания пыли сопровождаются охлаждением газов или абсорбцией.

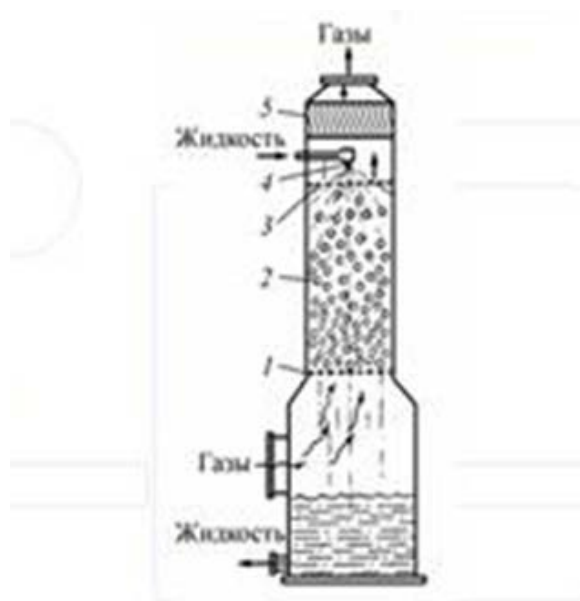


Рис. 11. Насадочный скруббер

Насадочные скрубберы представляют собой колонны, все сечение которых заполнено специальными насадками, по которым в виде пленки стекает жидкость. Запыленный газ поступает снизу колонны и движется противотоком к жидкости. Поверхностью контакта фаз в этом устройстве является именно смоченная поверхность насадок.



Если насадка скруббера в недостаточной мере орошается жидкостью, то на ее элементах (в виде шариков или колец) может налипать и скапливаться пыль, что неизбежно увеличивает гидравлическое сопротивление и, как следствие, снижает производительность установки. Чтобы очистить насадку от загрязнений, ее требуется вынуть из фильтра, а это довольно трудоемкая работа. Поэтому для очистки запыленных газов используют исключительно регулярную насадку, имеющую крупные элементы или же иную насадку – хордовую.

В таких установках, как насадочные скрубберы, расход жидкости составляет от 1,5 до 8 кубометров на одну тысячу кубических метров газа. Их гидравлическое сопротивление так же, как и в полых скрубберах, невелико, но все же несколько больше – от 200 до 320 Па.

В насадочных скрубберах степень улавливания пыли зависит от точно таких же факторов, что и в полых аппаратах. Насадочный скруббер способен уловить до 75 процентов частиц пыли, размер которых составляет от 2 до 6 микрон и до 80–92 % частиц более крупных размеров. Мельчайшие частицы пыли (1 микрон и меньше) улавливаются данными установками крайне плохо.

### Центробежный скруббер

В таких установках, как центробежные скрубберы, мокрая очистка осуществляется благодаря вращению газового потока, контактирующего с жидкостью, под действием центробежных сил. Так же их еще называют динамические скрубберы.

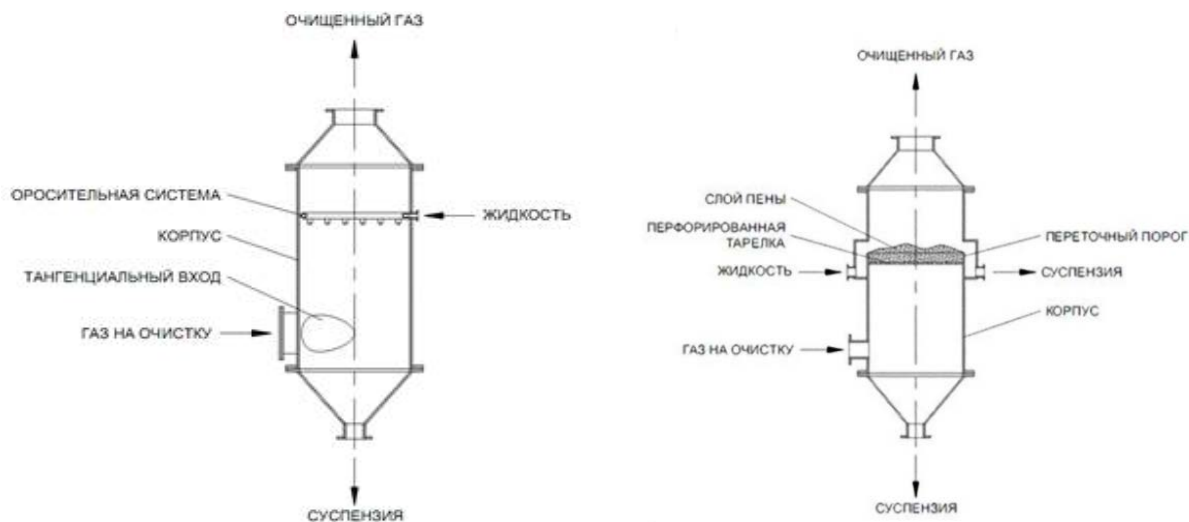


Рис. 12. Центробежные скрубберы

Поток запыленного газа, двигаясь со скоростью около 20 м/с, посредством расположенного тангенциально входного патрубка прямоугольного сечения поступает в цилиндрический корпус, приобретая там вращательное движение.

Жидкость, подведенная из кольцевой питающей трубы к соплам, непрерывно орошает внутреннюю поверхность корпуса. Это осуществляется следующим образом. Выходящая из сопла струя жидкости идет в сторону вращения газа тангенциально к внутренней поверхности корпуса и обильно ее смачивает. После чего жидкость начинает стекать тонкой пленкой по всей внутренней поверхности корпуса скруббера.

Взвешенные частички пыли в потоке газа, который поднимается по винтовой пространственной линии, отбрасываются под действием центробежной силы к стенкам установки, где смачиваются и улавливаются пленкой жидкости. У патрубка, где входит газ, мокрой пленки нет, так как она в этом месте разрушается, превращаясь в туман. На поверхности капле этого тумана так же оседает какая-то часть пыли. Далее жидкость с частицами пыли, которая представляет собой суспензию, выводится из скруббера посредством конического днища. Газ, уже очищенный от пыли, удаляется из установки через, расположенный в самом верху, выходной патрубок.

В центробежных скрубберах, по сравнению с вышеописанными устройствами, расход жидкости совсем небольшой и составляет всего 0,1–0,2 кубометров на тысячу кубических метров газа. Гидравлическое сопротивление зависит от двух основных факторов – диаметра скруббера и скорости запыленного газа во входном патрубке. Как правило, при скорости газа 20 м/с на входе в устройство оно составляет в пределах от 500 до 800 Па.

Что касается степени улавливания пыли, то в центробежных скрубберах она несколько больше, чем в тех же насадочных скрубберах. Частицы пыли, размер которых составляет от 2 до 5 микрон, улавливаются фильтром примерно на 90 %, более же крупные частицы (от 15 и выше микрон) улавливаются на 95 %.

### **Тарельчатый барботажный скруббер**

**Тарельчатый барботажный или пенный скруббер** – сложное устройство мокрой очистки воздуха. Тарельчатые барботажные скрубберные установки могут быть с провальными тарелками и с переливными тарелками. Корпус фильтра обычно разборный. Принцип работы такой: тарелки (щелевые или дырчатые) поливаются жидкостью. Образующаяся на них пена захватывает частицы пыли. Удаление из аппарата происходит в виде шлама.

Такие установки, как барботажные ловители, применяют в основном для очистки тех газов, которые очень сильно запылены. В данных фильтрах контактирующая с газом жидкость доводится до такого состояния, что она превращается в подвижную пену, обеспечивая тем самым большую поверхность контакта фаз.

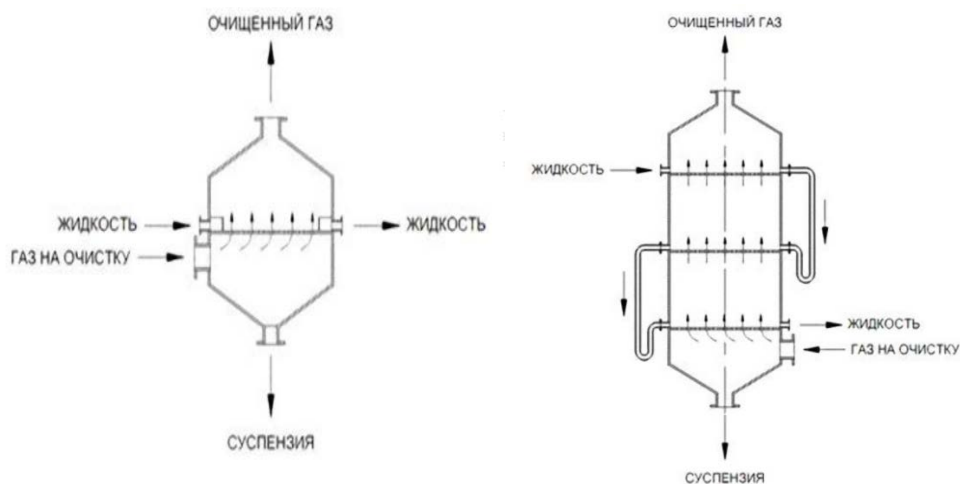


Рис. 13. Барботажный скруббер

Барботажный (пенный) пылеуловитель состоит из прямоугольного или цилиндрического корпуса, в верхней части которого имеется перфорированная тарелка. Промывная жидкость подается на эту тарелку посредством штуцера. В нижней части установки есть входной патрубок, через который в пенный уловитель подается запыленный газ. Газ, проходя через предусмотренные в тарелке отверстия, барботирует, то есть перемешивает жидкость, превращая ее тем самым в подвижную пену. В слоях этой пены частицы пыли поглощаются промывочной жидкостью, некоторая часть которой удаляется из пылеуловителя посредством переточного порога, а оставшаяся часть жидкости проходит через отверстия в тарелке, тем самым их промывая и заодно улавливая крупные частицы пыли, которые находятся в пространстве под тарелкой. Полученная суспензия далее просто выводится из устройства.

При очень большом загрязнении газа и в тех случаях, когда требуется высокое качество очистки запыленного газа, используют уловители с двумя или тремя (иногда и больше) тарелками.

В барботажных (пенных) уловителях расход жидкости, как правило, составляет 0,2–0,3 кубометра на тысячу кубических метров газа. Установки с одной тарелкой имеют гидравлическое сопротивление от 500 до 1000 Па.

Частицы пыли больших размеров (от 20 микрон и более) улавливаются пенными аппаратами почти что полностью. Что касается более мелких частиц (5 микрон), то они улавливаются лишь на 8–90 %. Самые мельчайшие частички улавливаются устройством довольно плохо, особенно если они гидрофобны.

В процессе работы барботажных установок не допускается значительное колебание расхода газа, так как это может нарушить пенный режим, а также загрязнить отверстия тарелки.

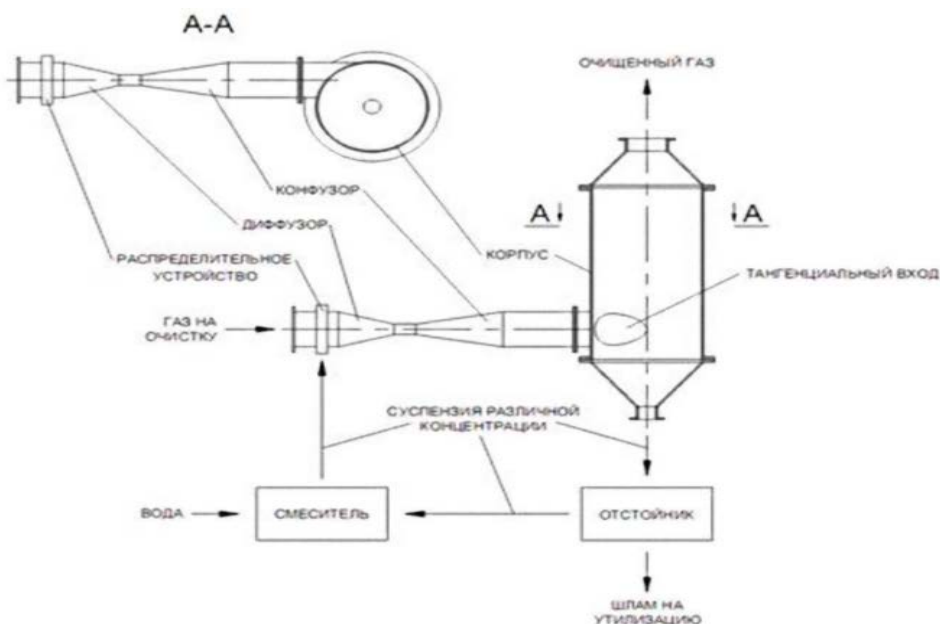
Современным видом мокрой очистки газов является пенный, который широко применяется в промышленности. В таких аппаратах жидкость взаимодействует с газом и приводится таким образом в состояние подвижной пены. Следовательно, образуется достаточно большая поверхность контакта между газом и жидкостью.

Однополочный пенный фильтр представляет собой полую камеру, которая имеет прямоугольное или круглое сечение, в которой находится несколько или одна решетка. Промывная жидкость попадает в установку через штуцер и входную коробку, а газ подается в аппарат под решетку. Когда газ проходит через отверстия решетки, то он вспенивает жидкость, поэтому по решетку уже движется слой пены, и именно в нем и происходит очистка газа от твердых частиц. Самые маленькие взвешенные частицы удаляются благодаря пленке жидкости, которая протекает по решетке. Частицы дисперсной фазы, который имеют больший размер, фильтруются жидкостью, которая протекает в пространстве под решеткой.

Помимо этого, используются и трехполочные пенные установки, производительность которых еще больше. Эффективной работы таких аппаратов в первую очередь зависит от того, с какой скоростью протекает газ по свободному сечению камеры.

### Скруббер Вентури

**Скруббер Вентури** – газопромыватель состоит из труб, в которые под высоким напором поступают газ и жидкость. Капли жидкости захватывают твердые частицы и вместе с ними оседают в каплеуловитель.



в полом скруббере: водяными парами. Если этого не сделать, то мелкие капельки жидкости будут испаряться в трубе

Рис. 14. Скруббер Вентури

Процесс очистки воздуха от пыли в этих аппаратах происходит благодаря коагуляции твердых частиц при смачивании жидкостью. Принцип работы скруббера Вентури основывается на этом физическом явлении. Намокшие пылинки, двигаясь в газоздушном потоке, при соударении слипаются, сепарируются в уловителе и удаляются.

Главная задача мокрой очистки воздуха от пылевых частиц – обеспечение максимальной площади контакта газовой смеси с жидкостью.

Процесс осуществляется внутри трубы Вентури – основного элемента схемы скрубберов данного типа. Конструкция состоит из двух конусообразных отрезков труб, присоединенных к горловине суженными частями. Форма трубы напоминает песочные часы. Запыленный воздух подается в конфузор. Продвигаясь по трубе сужающегося диаметра, газовоздушный поток разгоняется согласно уравнению Бернулли. Чем больше перепад площади поперечного сечения на входе и выходе конфузора, тем выше скорость. В полость сужающейся секции по форсункам подается техническая вода или раствор абсорбирующего реагента. В быстро движущемся газовом потоке возникают завихрения, которые дробят распыленную форсунками жидкость на капли микроскопического размера. Подобная схема обуславливает высокую эффективность очистки от газов и твердых включений в скрубберах Вентури. Микрокапли обволакивают пылевые частицы, вызывая их слипание, или абсорбируют вредные газообразные компоненты. Турбулентность помогает лучше перемешивать жидкость и воздушный поток. Пройдя горловину, воздух поступает в диффузор. Здесь скорость движения потока замедляется. Микрокапли с уловленной пылью или газом соединяются. На выходе из устройства взвесь жидкости отделяется в инерционном каплеуловителе, а очищенный воздух выбрасывается в атмосферу. Наиболее активно пылевая фракция улавливается, когда скорости загрязненного воздуха и взвеси жидкости сильно отличаются.

Первый раз максимум достигается в начале процесса перемешивания. Более тяжелые капли отстают от газовоздушного потока, собирая пылинки, которые догоняют их по курсу движения. Второй раз очистка достигает оптимального значения в конце трубы, когда скорость потока падает. Массивные капли обладают большей инерцией, чем воздух, поэтому замедляются меньше. Двигаясь сквозь газовоздушный поток, частицы жидкости собирают пылинки, догоняя их по ходу движения.

Главные преимущества скрубберов Вентури обусловлены их принципом действия. Основной элемент установки – труба переменного диаметра, в которой нет движущихся частей. Подобная схема позволяет сделать конструкцию компактной. Отсутствие подвижных деталей обуславливает высокий уровень надежности.

Главные недостатки скрубберов Вентури также вытекают из принципа работы. Так как очищаемый газовоздушный поток сильно разгоняется, содержащаяся в нем твердая фракция на высокой скорости соприкасается со стенками трубы. Такая «бомбардировка» наносит ущерб внутренней поверхности. Если пыль имеет абразивные свойства, конструкция скруббера быстро изнашивается.

Чтобы уменьшить эрозионное воздействие пылевых частиц, внутренние поверхности футеруются карбидом кремния. Эта мера продлевает срок службы устройства. Для удобства замены защитные элементы часто выполняются в виде съемных втулок. Это инженерное решение усложняет конструктивную схему скруббера Вентури и его стоимость, но облегчает обслуживание и ремонт.

### **3. ТЕХНОЛОГИЯ ЗАЩИТЫ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ**

#### **3.1. Классификация сточных вод и основные направления сокращения количества сточных вод на промышленных тепловых электростанциях**

Развитие промышленности влечет за собой необходимость в предотвращении отрицательного воздействия производственных сточных вод на водоемы. В связи с чрезвычайным разнообразием состава, свойств и расходов сточных вод промышленных предприятий необходимо применение специфических методов, а также сооружений по их локальной, предварительной и полной очистке.

В составе инженерных коммуникаций каждого промышленного предприятия имеется комплекс канализационных сетей и сооружений, с помощью которых осуществляется отведение с территории предприятия отработанных вод (дальнейшее использование которых либо невозможно по техническим условиям, либо нецелесообразно по технико-экономическим показателям), а также сооружений по предварительной обработке сточных вод и извлечению из них ценных веществ и примесей.

К производственным сточным водам относятся воды, использованные в технологическом процессе производства или получающиеся при добыче полезных ископаемых. Производственные сточные воды делятся на две основные категории: загрязненные и незагрязненные (условно чистые).

Загрязненные производственные сточные воды содержат различные примеси и подразделяются на три группы:

- а) загрязненные преимущественно минеральными примесями;
- б) загрязненные преимущественно органическими примесями;
- в) загрязненные минеральными и органическими примесями.

По характеру примесей, с точки зрения их физико-химического состава, сточные воды делятся на две большие группы – гомогенные и гетерогенные системы, в которых можно выделить:

- а) сточные воды, содержащие нерастворимые в воде примеси с величиной частиц 10–10 нм и более;
- б) сточные воды, содержащие коллоидные примеси;
- в) сточные воды, содержащие газы и молекулярно-растворимые органические вещества;
- г) сточные воды, содержащие истинно-растворимые вещества.

По концентрации загрязняющих веществ, производственные сточные воды делятся на четыре группы:

- от 1 до 500 мг/л – слабоконцентрированные;
- от 500 до 5000 мг/л – слабоконцентрированные;
- от 500 до 30 000 мг/л – высококонцентрированные;
- свыше 30 000 мг/л – высококонцентрированные.

По степени агрессивности производственные сточные воды разделяют на слабоагрессивные (слабокислые с  $\text{pH} = 6-6,5$  и слабощелочные с  $\text{pH} = 8-9$ ), сильно-агрессивные (сильнокислые с  $\text{pH} < 6$  и сильнощелочные с  $\text{pH} > 9$ ) и неагрессивные (с  $\text{pH} = 6,5-8$ ).

Методы очистки сточных вод подразделяются на механические, физико-химические и биологические. Для правильного выбора метода и необходимой степени очистки сточных вод нужно иметь подробные данные о примесях, их количестве и составе.

### **3.2. Нормирование содержания загрязняющих веществ в водоемах**

Особенности нормирования химических веществ в водной среде обусловлены следующими факторами.

1. С гигиенических позиций оценивается уровень загрязнения воды, предназначенной для хозяйственно-питьевого и культурно-бытового назначения.

2. Нормативы качества воды распространяются не на весь водный объект, а только на пункты водопользования населения.

3. Вода используется населением не только для питья, приготовления пищи, личной гигиены, но и для хозяйственно-бытовых и рекреационных целей. Отсюда при нормировании учитывается непосредственное влияние химических загрязнителей на организм (санитарно-токсикологический показатель вредности), а также их влияние на органолептические свойства воды и процессы самоочищения воды водоемов (органолептический и общесанитарный показатель вредности).

4. Для водных объектов, используемых населением (поверхностные и подземные воды, питьевая вода, вода систем горячего водоснабжения), устанавливаются единые гигиенические нормативы (ПДК, ПДН).

Основным нормативным требованием к качеству воды в водном объекте является соблюдение установленных предельно допустимых концентраций или группы экологических стандартов, оценивающих состояние водной экосистемы и качество воды с точки зрения ее опасности или безопасности для здоровья людей.

ПДК вредных веществ в водном объекте – это такая концентрация, при превышении которой вода становится непригодной для одного или нескольких видов водопользования.

Таблица 2 – Предельно допустимые концентрации веществ в воде водоемов

Соединение	Лимитирующий показатель	Класс опасности	ПДК для водоемов, мг/л	
			культурно-бытового и хозяйственно-питьевого водопользования	Рыбохозяйственного водопользования
Ацетон	Общесанитарный	3	2,2	–
Бензол	Санитарно-токсиколог.	2	0,54	0,05
Фенол	Санитарно-токсиколог.	4	0,001	0,001
Аммиак	Органолептический	3	2,0	0,05
Формальдегид	Санитарно-токсиколог. Санитарно-токсиколог.	2	0,05	–

Состав и свойства воды в водных объектах должны соответствовать нормативам в створе или поперечном сечении, заложенном на водотоках – в 1 км выше ближайшего по течению пункта водопользования (хозяйственно-питьевое водоснабжение, место купания, организованный отдых, территория населенного пункта и т. д.), а на непроточных водоемах – в радиусе 1 км от пункта водопользования.

Для веществ, загрязняющих воду так же, как для примесей в атмосферном воздухе, установлено раздельное нормирование качества воды. Однако принцип разделения здесь связан с приоритетным назначением водного объекта или категориями водопользования.

Для обеспечения чистоты водных объектов используется другой ограничительный норматив – лимитирующий показатель вредности, не имеющий количественной характеристики, но отражающий приоритетность требований к качеству воды в тех случаях, когда водный объект имеет многофункциональное назначение.

В основу приоритетности нормирования воды в водных объектах культурно-бытового и хозяйственно-питьевого назначения положены преимущественно санитарно-токсикологический, общесанитарный и органолептический лимиты, а в рыбохозяйственных – токсикологический и отчасти органолептический.

Загрязнение воды связано не только с присутствием в ней токсичных или дурнопахнущих веществ, но и с изменением ряда других физико-химических показателей, таких как содержание взвешенных веществ, минеральный состав, растворенный кислород, температура, рН и др. В створах водопользования состав и свойства воды ни по одному из названных показателей не должны превышать установленный норматив. При использовании водного объекта для различных нужд приоритетными являются более жесткие требования в ряду одноименных показателей. Главным с гигиенических позиций требованием к качеству питьевой воды является ее безопасность в эпидемическом отношении.



Санитарное состояние водоема отвечает требованиям норм при выполнении неравенства [4]:

$$\sum_{i=1}^n \frac{N_i}{C_i} \leq 1 \quad (12)$$

где  $n$  – число вредных веществ в водоеме, относящихся, например, к «санитарно-токсикологической» группе вредных веществ;

$C_i$  – концентрация  $i$ -го вещества из данной группы вредных веществ;

$m$  – номер группы вредных веществ, например,  $m = 1$  – для «санитарно-токсикологической» группы вредных веществ,  $m = 2$  – для «общесанитарной» группы вредных веществ и т. д.

При преобладании одного вредного вещества с концентрацией  $C$  в группе вредных веществ данного ЛПВ должно выполняться требование:

$$C + C_{\phi} \leq \text{ПДК}.$$

Для самих сточных вод ПДК не нормируются, а определяются предельно допустимые количества сброса вредных примесей (ПДС).

Запрещено сбрасывать в водоемы сточные воды, если: существует возможность повторного использования одной и той же воды в технологическом процессе; стоки содержат ценные отходы, которые возможно утилизировать; стоки содержат сырье, реагенты и продукцию производства в количествах, превышающих технологические потери; сточные воды содержат вещества, для которых не установлены ПДК [10].

Режим сброса может быть единовременным, периодическим, непрерывным с переменным расходом, случайным.

Одной из задач регулирования качества вод в водоемах является задача определения допустимого состава сточных вод, то есть того максимального содержания вредного вещества (веществ) в стоках, которое после сброса еще не даст превышения концентрации вредного вещества в водах водоема над ПДК данного вредного вещества.

Уравнение баланса растворенной примеси при сбросе ее в водоток (реку) с учетом начального разбавления в створе выпуска:

$$C_{\text{ст}} = [n_{\text{р.с.}} (C_{\text{р.с.}} - C_{\phi}) + C_{\phi}], \quad (13)$$

где  $C_{\text{ст}}$ ,  $C_{\text{р.с.}}$ ,  $C_{\phi}$  – концентрации примеси в сточных водах до выпуска в водоем, в расчетном створе и фоновая концентрация примеси, мг/кг;

$n_0$  и  $n_{\text{р.с.}}$  – кратность разбавления сточных вод в створе выпуска (начальное разбавление) и в расчетном створе.

Начальное разбавление сточных вод в створе их выпуска:

$$n_0 = \frac{Q_0 + q}{q} \quad (14)$$

где  $Q_0 = LHV$  – часть расхода водостока, протекающая над рассеивающим выпуском, имеющим, положим, вид перфорированной трубы, уложенной на дно, м<sup>3</sup>/с;

$q$  – расход сточных вод, м<sup>3</sup>/с;

$L$  – длина рассеивающего выпуска (перфорированной трубы), м;

$H, V$  – средняя глубина и скорость потока над выпуском, м и м/с.

После подстановки получаем:

$$\tilde{N}_{c\delta} = \frac{LHV + q}{q} [n_{p.c.}(C_{p.c.} - C_{\delta}) + C_{\delta}] \quad (15)$$

При  $LHV \gg q$ :

$$C_{c\delta} = \frac{LHV}{q} [n_{p.c.}(C_{p.c.} - C_{\delta}) + C_{\delta}] \quad (16)$$

По ходу водостока струя сточной воды расширяется (за счет диффузии, турбулентной и молекулярной), вследствие чего в струе происходит перемешивание сточной воды с водой водотока, возрастание кратности разбавления вредной примеси и постоянное уменьшение ее концентрации в струе перемешанной воды. В конечном счете створ (сечение) струи расширится до створа водотока. В этом месте водотока (где створ загрязненной струи совпал со створом водотока) достигается максимально возможное для данного водотока разбавление вредной примеси. В зависимости от величин кратности начального разбавления, ширины, скорости, извилистости и других характеристик водотока концентрация вредной примеси ( $C_{p.c.}$ ) может достигнуть значения ее ПДК в разных створах загрязненной струи. Чем раньше это произойдет, тем меньший участок (объем) водотока будет загрязнен вредной примесью выше нормы (выше ПДК). Понятно, что самый подходящий вариант – когда условие обеспечивается уже в самом месте выпуска, и, таким образом, размеры загрязненного участка водотока будут сведены к нулю. Этот вариант соответствует условию выпуска стоков в водоток вне населенного пункта. Нормативное разбавление до ПДК в створе выпуска требуется и для водотоков, если выпуск осуществляется в черте населенного пункта.

В этом случае, учитывая, что для створа выпуска  $n_{pc} = 1$ , а также подставив в  $C_{pc} = \text{ПДК}$ , получим:

$$C_{cm} = \frac{BHV + q}{q} \quad \text{ПДК} = \frac{Q + q}{q} \text{ ПДК}, \quad (17)$$

где  $B$  и  $H$  – эффективные ширина и глубина водотока;

$Q = BHV$  – расход воды водотока.

Уравнение означает, что при максимальном использовании разбавительной способности водотока (расхода водотока) максимально возможную концентрацию вредного вещества в сбрасываемых сточных водах можно допустить равной:

$$\frac{Q + q}{q} \text{ ПДК} = \frac{Q}{q} \text{ ПДК}. \quad (18)$$

Если для целей разбавления стоков возможно использование только части расхода воды водотока, например,  $0,2Q$ , то требования к очистке стоков от данного вредного вещества повышаются, так как максимально допустимая концентрация вредности в стоках уменьшается при этом в 5 раз:  $0,2Q \text{ ПДК}$ . При этом величина  $qC_{cm}$ , равная в первом случае  $qQ/q \times \text{ПДК} = Q \times \text{ПДК}$ , а во втором  $(q0,2Q - \text{ПДК})/q = 0,2Q \times \text{ПДК}$  должна рассматриваться как предельно допустимый сброс (ПДС) данной вредности в водоток, г/с [10]. При

превышении данных величин ПДС ( $Q \times \text{ПДК}$  и  $0,2Q \times \text{ПДК}$ , г/с) концентрация вредного вещества в водах водотока превысит ПДК.

На изложенных принципах основывается регулирование качества воды в водотоках при сбросе в них взвешенных, органических веществ, а также вод, нагретых в системах охлаждения предприятий [10].

Условия смешения сточных вод с водой озер и водохранилищ значительно отличаются от условий их смешения в водотоках – реках и каналах. Полное перемешивание стоков и вод водоема достигается на существенно больших расстояниях от места выпуска.

### 3.3. Способы и аппараты для очистки промышленных сточных вод. Расчет предельно допустимого сброса

Методы очистки сточных вод подразделяются на механические, физико-химические и биологические. Для правильного выбора метода и необходимой степени очистки сточных вод нужно иметь подробные данные о примесях, их количестве и составе. В таблице 3 приводятся рекомендации по выбору метода очистки сточных вод в зависимости от состава и концентраций загрязняющих веществ.

Таблица 3 – Рекомендуемые методы очистки сточных вод

Концентрация загрязняющих веществ, мг/л	Методы очистки сточных вод, содержащих вещества			
	Преимущественно органические с температурой кипения, С			Преимущественно неорганические
	< 120	120–250	> 250	
1–500	биологический, химический, сорбционный		химический, сорбционный	механический химический, сорбционный
500–5000	химический (озонирование, хлорирование), сорбционный, жидкофазное окисление с биологической доочисткой, сжигание в печах	химический, сорбционный, экстракционный, жидкофазное окисление с биологической доочисткой, сжигание в печах	сорбционный, жидкофазное окисление с биологической доочисткой, сжигание в печах	механический сорбционный, выпаривание
5000–30000	химический, экстракционный, жидкофазное окисление с биологической доочисткой, сжигание в печах			механический, выпаривание, сброс в море, захоронение в земле, сушка в кипящем слое
> 30000	экстракционный, жидкофазное окисление с различными методами доочистки, сжигание в печах			то же

## **Механическая очистка сточных вод (физические методы) /1,6–8/**

Механическая очистка, как правило, является предварительным способом очистки производственных сточных вод и применяется для сточных вод, в которых довольно высокая концентрация нерастворенных минеральных и органических примесей. Для механической очистки применяют операции процеживания, отстаивания и фильтрации.

Процеживание предназначено для выделения из сточных вод механических частиц размером 100–250 мкм, а также более мелких волокнистых загрязнений, которые в процессе дальнейшей обработки стоков слипаются и препятствуют нормальной работе очистного оборудования.

Отстаивание предназначено для выделения из сточной воды нерастворенных и частично-коллоидных механических загрязнений органического и минерального происхождения. Оно основано на закономерностях осаждения твердых частиц в жидкости. При этом может осуществляться свободное осаждение частиц, склонных к коагулированию в процессе осаждения и изменяющих при этом свою форму и размеры. Свободное осаждение наблюдается при концентрации частиц до 1 % или 8 кг/м. Отстаивание осуществляется в песколовках и отстойниках.

Фильтрация – предназначена для глубокой очистки сточных вод от взвешенных веществ, удаление которых процеживанием и отстаиванием затруднено. Разделение фаз ведут при помощи пористых перегородок, пропускающих жидкость и задерживающих твердые частицы. Выбор перегородок зависит от свойств сточной воды, температуры и других факторов. Чаще всего используют фильтры с сетчатыми элементами (микрофильтры и барабанные сетки) и фильтры с зернистым слоем.

В зависимости от требований к качеству очищенной сточной воды применяют различные очистные сооружения: для процеживания – решетки и сетки, предназначенные для задержания крупных частиц примесей, движущихся по каналу; для задержания мелких взвешенных в воде примесей – отстойники, фильтры, гидроциклоны и т. д.

### **3.3.1. Расчет песколовок**

Песколовки применяют для предварительной очистки сточных вод от тяжелых нерастворимых примесей: песка, земли со средним размером частиц около 250 мкм. Песколовки необходимо предусматривать при производительности сооружений свыше 100 м<sup>3</sup>/сут. Число песколовок или отделений песколовок надлежит принимать не менее двух, причем все песколовки или отделения должны быть рабочими.

В зависимости от направления движения сточной воды песколовки подразделяются на горизонтальные, тангенциальные и аэрируемые.

Тип песколовки (горизонтальная, тангенциальная, аэрируемая) выбирается с учетом производительности очистных сооружений, схемы

очистки сточных вод и обработки их осадков, характеристики взвешенных веществ, компоновочных решений и т. п.

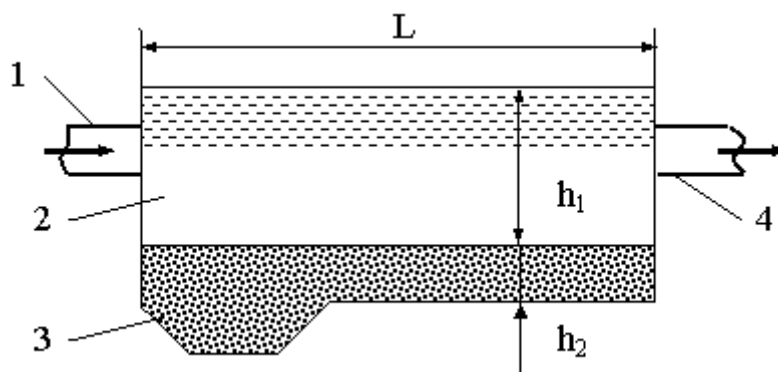


Рис. 15. Схема горизонтальной песколовки

Схема горизонтальной песколовки с прямолинейным движением сточной воды, поступающей в песколовку (2) через входной патрубок (1). Оседающие в процессе движения воды твердые частицы скапливаются в шламосборнике (3) и на дне песколовки, а очищенная сточная вода через выходной патрубок 4 направляется для дальнейшей обработки.

Глубину  $h_1$  выбирают из условия  $h_1 / w_0 \leq \tau_{\text{ПР}}$ , где  $\tau_{\text{ПР}}$  – время движения воды в песколовке, составляет обычно 30...100 с.

Длину песколовки определяют по формуле:

$$L = k \cdot h_1 \frac{w}{w_0}, \quad (19)$$

где  $w = 0,15...0,3$  м/с – скорость движения воды в песколовке;

$k = 1,3...1,7$  – коэффициент, учитывающий влияние турбулентности и неравномерности скоростей движения сточной воды в песколовке.

Ширину  $B$  песколовки определяют с учетом реализации заданного расхода сточных вод ( $Q$ ):

$$B = \frac{Q}{h_1 \cdot w \cdot n}, \quad (20)$$

где  $n$  – число секций в песколовке.

Таблица 4 – Значение в зависимости от типа песколовков

Диаметр задерживаемых частиц песка, мм	Гидравлическая крупность песка, мм/с	Значение в зависимости от типа песколовков в отношении ширины к глубине аэрируемых песколовков			
		горизонтальные	аэрируемые		
			1	1,25	1,5
0,15	13,2	-	2,62	2,50	2,39
0,20	18,7	1,7	2,43	2,25	2,08
0,25	24,2	1,3	-	-	-

При проектировании песколовков следует принимать общие параметры для песколовков различных типов по табл. 4:

а) для горизонтальных песколовков – продолжительность протекания сточных вод при максимальном притоке не менее 30 с;

б) для аэрируемых песколовков:

- 1) установку аэраторов из дырчатых труб – на глубину 0,7 вдоль одной из продольных стен над лотком для сбора песка;
- 2) интенсивность аэрации – 3–5 м/(м \* ч);
- 3) поперечный уклон дна к песковому лотку – 0,2–0,4;
- 4) впуск воды – совпадающий с направлением вращения воды в песколовке, выпуск – затопленный;
- 5) отношение ширины к глубине отделения - =1:1,5;

в) для тангенциальных песколовков:

- 1) нагрузку – 110 м/(м \* ч) при максимальном притоке;
- 2) впуск воды – по касательной на всей расчетной глубине;
- 3) глубину – равную половине диаметра;
- 4) диаметр – не более 6 м.

### 3.3.2. Расчет отстойника

Отстаивание воды для выделения из нее нерастворенных оседающих или всплывающих механических примесей является одним из наиболее распространенных в практике способов разделения суспензий. Отстаивание производится в горизонтальных, радиальных или комбинированных отстойниках. Тип отстойника (вертикальный, радиальный, с вращающимся сборно-распределительным устройством, горизонтальный и др.) необходимо выбирать с учетом принятой технологической системы очистки сточных вод и обработки их осадка, производительности сооружений, конфигурации и рельефа площадки и т. п. Отстойники различают периодического и непрерывного действия. По направлению движения воды они делятся на горизонтальные, вертикальные и радиальные.

Основным исходным параметром при технологическом расчете отстойников всех типов является скорость осаждения взвешенных частиц (гидравлическая крупность), для выделения которых предназначен отстойник. Скорость осаждения зависит, в свою очередь, от целого ряда факторов – от размера частицы и ее формы; от плотности частицы и плотности воды, в которой происходит осаждение; от вязкости воды; от скорости и направления потока воды в отстойнике и др.

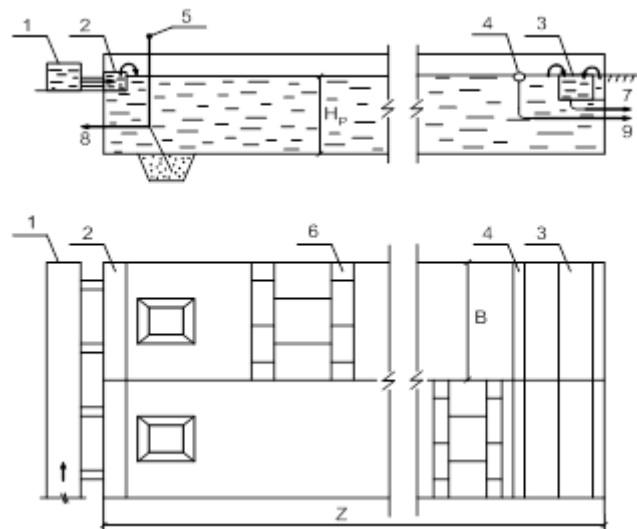


Рис. 16. Схема горизонтального отстойника с ленточным скребковым устройством:

- 1 – подводящий канал; 2 – распределительный лоток; 3 – сборный лоток;  
 4 – поворотная труба с щелевидными прорезями для удаления плавающих  
 веществ; 5 – гидроэлеватор; 6 – скребковый механизм;  
 7 – отвод осветленной воды; 8 – отвод осадка; 9 – отвод плавающих веществ

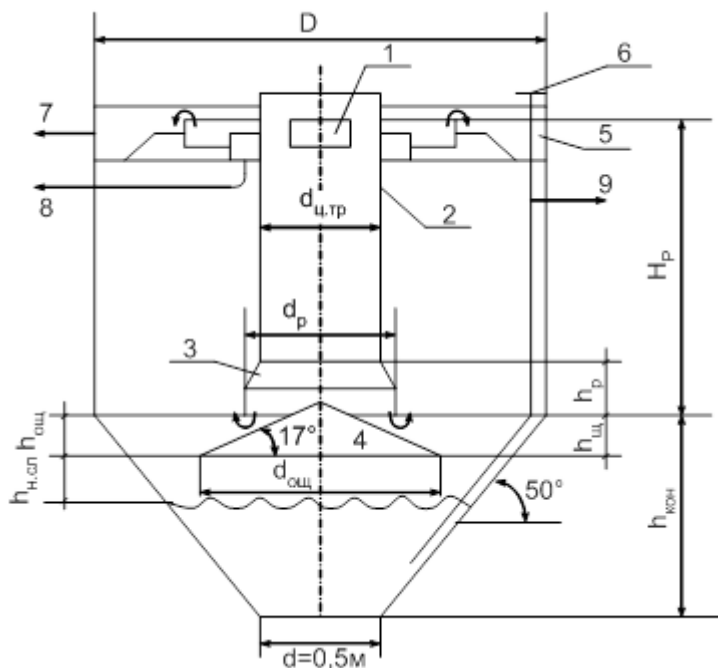


Рис. 17. Схема вертикального отстойника

- 1 – подводящий канал исходной воды; 2 – центральная труба; 3 – раструб;  
 4 – отражательный щит; 5 – водосборный лоток; 6 – гидроэлеватор; 7 – отвод  
 осветленной воды; 8 – отвод всплывающих веществ; 9 – отвод осадка

Число отстойников следует принимать: первичных – не менее двух, вторичных – не менее трех при условии, что все отстойники являются рабочими, при минимальном числе их расчетный объем необходимо увеличивать в 1,2–1,3 раза.

Основным исходным параметром при технологическом расчете отстойников всех типов является скорость осаждения взвешенных частиц (гидравлическая крупность), для выделения которых и предназначен отстойник. Скорость осаждения зависит в свою очередь от целого ряда факторов – от размера частицы и ее формы; от плотности частицы и плотности воды, в которой происходит осаждение; от вязкости воды; от скорости и направления потока воды в отстойнике и др. Для проектирования сооружений и аппаратов механической очистки должны быть заданы следующие данные:

- общее количество сточных вод, м<sup>3</sup>/ч;
- температура сточных вод, С;
- периодичность образования сточных вод;
- тяжелые механические примеси, мг/л;
- нефтепродукты, масла, мг/л;
- плотность тяжелых и легких загрязнений, г/см<sup>3</sup>; кинетика осаждения механических примесей тяжелее и легче воды при их расчетной концентрации в исходной воде;
- требуемая степень очистки (%) или допустимое содержание загрязнений легче и тяжелее воды, мг/л;
- гидравлическая крупность частиц тяжелее и легче воды, которую необходимо выделить для обеспечения требуемой степени очистки, мм/с.

### **3.3.3. Химическая очистка сточных вод (физико-химические методы очистки сточных вод)**

Производственные сточные воды от технологических процессов очень часто содержат щелочи и кислоты. В большинстве кислых стоков содержатся растворимые соли тяжелых цветных металлов, которые необходимо выделять из сточных вод.

С целью предупреждения коррозии материалов канализационных очистных сооружений, нарушения биохимических процессов в водоемах, а также осаждения из сточных вод солей тяжелых металлов кислые и щелочные стоки подвергают химической очистке.

Химическая очистка может применяться как самостоятельный метод перед подачей производственных сточных вод в систему оборотного водоснабжения, а также перед спуском их в водоемы. Применение химической очистки в ряде случаев целесообразно перед биологической или физико-химической очисткой. Основными методами физико-химической очистки производственных сточных вод являются нейтрализация и окисление.

Кислые и щелочные сточные воды перед сбросом их в промышленную канализацию или водоемы должны быть нейтрализованы до достижения



величины рН, равной 6,5–8,5. При нейтрализации сточных вод допускается смешение кислых и щелочных стоков для их взаимонейтрализации.

Нейтрализация – химическая реакция между кислотой и основанием. Нейтральными считаются сточные воды, имеющие  $\text{pH} = 6,5\text{--}8,5$ . Нейтрализации подвергаются сточные воды с  $\text{pH} < 6,5$  и  $\text{pH} > 8,5$ .

Большую опасность представляют кислые стоки, которых образуется гораздо больше, чем щелочных. При химической очистке применяют следующие способы нейтрализации:

- взаимная нейтрализация кислых и щелочных сточных вод;
- нейтрализация реагентами;
- фильтрация через нейтрализующие материалы.

Выбор способа нейтрализации зависит от многих факторов: вида и концентрации кислот, загрязняющих промстоки, расхода и режима поступления отработанных вод на нейтрализацию, наличия реагентов, местных условий, в которых происходит очистка и т. д.

Режимы сброса сточных вод, содержащих кислоты и щелочи, как правило, различны. Кислые воды обычно сбрасываются в течение суток равномерно и имеют постоянную концентрацию, щелочные воды сбрасываются периодически по мере их накопления. В связи с этим для щелочных вод часто устраивают регулирующий резервуар, объем которого определяется суточным поступлением щелочных вод. Из этого резервуара щелочные воды равномерно выпускают в камеру реакции, где происходит взаимная нейтрализация.

### **3.3.4. Реагентная нейтрализация**

Если на предприятии невозможно обеспечить взаимную нейтрализацию стоков, т. е. имеются кислые или щелочные стоки, то применяют реагентный метод. Выбор реагента для нейтрализации кислых стоков зависит от вида кислот и их концентрации, а также от растворимости солей, образующихся в процессе химической реакции. Для нейтрализации кислых стоков ( $\text{pH} < 6,5$ ) применяют любой щелочной реагент, но чаще всего известь в виде пушонки, известкового молока или карбонаты кальция и магния в виде суспензии. Эти реагенты сравнительно дешевы и общедоступны, но имеют ряд недостатков: обязательно устройство усреднителей перед нейтрализационной установкой, затруднительна регулировка подачи реагентов и вообще сложность реагентного хозяйства. Скорость процесса невысокая (10–15 мин.) и зависит от крупности частиц и растворимости образующихся соединений.

Образующаяся соль выпадает в осадок. Растворимость этой соли при  $t = 0\text{--}40^\circ\text{C}$  колеблется от 1,8 до 2,1 %. При более высокой концентрации выпадает в осадок. Это, кстати, большой недостаток, т. к. выделение из перенасыщенного раствора может продолжаться несколько суток и приводит к зарастанию трубопроводов. Обычно доза реагента для нейтрализации применяется на 10 % больше расчетной.

Теоретическое количество щелочного реагента, необходимое для нейтрализации 1 г кислот, приведено в табл. 5.

Таблица 5 – Теоретическое количество щелочных реагентов

Щелочной реагент	Количество реагента при нейтрализации кислот, г				
	серной	соляной	азотной	фосфорной	плавиковой
Активная окись кальция	0,57	0,77	0,44	0,86	1,40
Гидроокись кальция (известь гашеная)	0,75	1,01	0,59	1,13	1,86
Едкий натр	0,82	1,09	0,63	1,22	2,00
Карбонат кальция	1,02	1,37	0,80	1,53	2,50
Карбонат магния	0,86	1,15	0,67	1,21	2,10
Сода	1,09	1,45	0,84	1,62	2,65

### 3.3.5. Биологическая очистка

Биологические методы очистки сточных вод основываются на естественных процессах жизнедеятельности гетеротрофных микроорганизмов. Микроорганизмы обладают целым рядом особых свойств, из которых можно выделить три основных широко используемых для целей очистки: способность потреблять в качестве источников питания самые разнообразные органические (и некоторые неорганические) соединения для получения энергии и обеспечения своего функционирования; свойство быстро размножаться, в среднем число бактериальных клеток удваивается каждые 30 мин.; способность образовывать колонии и скопления, которые сравнительно легко можно отделить от очищенной воды после завершения процессов изъятия содержащихся в ней загрязнений.

В живой микробиальной клетке непрерывно и одновременно протекают два процесса – распад молекул (катаболизм) и их синтез (анаболизм), составляющие в целом процесс обмена веществ – метаболизм. Источником питания для гетеротрофных организмов являются углеводы, жиры, белки, спирты и т. д., которые могут расщепляться ими либо в анаэробных, либо в анаэробных условиях.

В качестве фильтрующего материала для загрузки фильтров применяется гравий, шлак, щебень, керамзит и т. д. Общие требования к загрузочным материалам – водостойчивость, устойчивость к специфическим загрязнениям стоков и достаточная прочность. При выборе загрузки предпочтение следует отдавать материалам с развитой поверхностью (шлак, керамзит, решетки из пластмассы).

## 4. ТВЕРДЫЕ ОТХОДЫ И ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОЧВЫ

### 4.1. Твердые бытовые отходы. Описание отходов. Классификация

Твердые бытовые отходы – это отходы, образующиеся в жилых и общественных зданиях в процессе жизнедеятельности человека, а также товары, утратившие свою потребительскую ценность в процессе их использования. Твердые бытовые отходы занимают значительную часть всех производимых отходов населением нашей страны. Ежегодно в России образуется до 70 млн т твердых бытовых отходов. По результатам подсчетов установлено, что на каждого жителя страны приходится приблизительно по 405 кг твердых бытовых отходов ежегодно. Количество образуемых отходов на одного человека с каждым годом растет на фоне роста экономики и населения страны [1–2]. Основная часть отходов образуется в двух больших мегаполисах: Москве и Московской области, Санкт-Петербурге и Ленинградской области ввиду большой плотности населения.

По своему агрегатному состоянию отходы различают на две большие группы: твердые и жидкие. Из всех производимых отходов потребления твердые бытовые отходы занимают значительную часть от общего объема в размере 96 %, а остальные 4 % – жидкие отходы. Состав твердых отходов неоднороден и включает в себя большое количество различных фракций, которые отличаются по своему составу и типу. Чтобы узнать состав отходов, необходимо определить морфологический состав [3]. Морфологический состав показывает процентное соотношение компонентов (фракций) отходов к общей массе. Морфологический состав ТБО является ключевой характеристикой отходов потребления. Материальный состав определяют с целью изучения ресурсной ценности твердых бытовых отходов, а также получения конкретных решений при переработке отходов.

Морфологический состав твердых бытовых отходов Российской Федерации представлен в табл. 6.

Таблица 6 – Морфологический состав твердых бытовых отходов РФ

Наименование фракции	Процентное отношение к общей массе, %
Органические отходы	35,6
Бумага и картон	21,5
Полимерные материалы	19,1
Отсев (фракции менее 16 мм)	9
Стекло	7,2
Текстиль, кожа, резина	3,5
Черные и цветные металлы	2,5
Дерево	1,1
Прочие материалы	0,5

Данные из таблицы наглядно демонстрируют о специфике отходов. Во-первых, описывают классы отходов, которые занимают всю нишу. Во-вторых, приводят количественную характеристику каждого из компонентов, содержащихся в отходах потребления. Каждый класс отходов делится на подкласс. Наглядное представление о подклассах можно получить из диаграммы на рис. 18.



Рис. 18. Диаграмма морфологического состава ТБО

На диаграмме рис. 18 представлен морфологический состав твердых бытовых отходов Санкт-Петербурга и Ленинградской области. Представленные данные отражают многообразие фракционного состава бытовых отходов [4].

С жидкими отходами ситуация кардинально противоположная. Все жидкости находятся в емкостях, и состав не меняется на протяжении всего периода жизни отходов, за исключением случаев, нарушающих целостность емкости. Тогда отходы стекают в одну большую лужу, нанося серьезный ущерб окружающей среде. В основном описываемый случай происходит на полигонах для хранения отходов, а также на несанкционированных свалках. К жидким отходам можно отнести продукты питания, которые в силу ряда причин утратили свою ценность, товары бытовой химии, товары для обслуживания техники (автомобиля и т. п.), горюче-смазочные материалы, лакокрасочные изделия, парфюмерия и т. д.

Вне зависимости от типа и вида все отходы по степени негативного воздействия на окружающую среду подразделяются на классы опасности [5]. Существует 5 классов опасности отходов:

1 класс – чрезвычайно опасные отходы. Степень воздействия на окружающую среду и человека очень высокая. Воздействие веществ отходов этого класса приводит к кардинальному изменению экологической обстановки. Окружающая среда не может восстановиться после воздействия токсичных веществ. К этому классу опасности можно отнести вещества и предметы, содержащие токсичные отходы: циановодород, озон, теллур, плутоний, диэтиртуть, полоний, бензапирен, фторооводоро, соли свинца, отходы от переработки ядерной энергетики, градусники, люминесцентные лампы и т. д.

2 класс – высоко опасные отходы. Степень воздействия на окружающую среду и человека оценивается как высокая. Окружающая среда сможет восстановиться после воздействия веществ через 30 лет и более. К этому классу опасности можно отнести следующие вещества и предметы: молибден, мышьяк, все нитриты, сурьму, формальдегид, селен, сероводород, барий, серную кислоту, литий, фенол, масла и аккумуляторы, автопокрышки, щелочи, кислоты, гальванические элементы, нефтесодержащие отходы.

3 класс – умеренно опасные отходы. Степень воздействия на окружающую среду и человека умеренная. Окружающая среда сможет восстановиться через 10 лет и более после снижения уровня воздействия отходов. К этому классу опасности можно отнести следующие отходы: бой керамической плитки и кирпича, древесные отходы, щебень, застывший раствор и бой стекла, металлолом и тара лакокрасочных материалов, соединения марганца, серебра, никеля, меди, бензосодержащие отходы, соляную кислоту, трихлорэтилен, фосфаты, этиловый спирт, отработанные медные провода, ацетон, обтирочные материалы, шлам очистки труб от нефти, масла (автомобильные, моторные), дизтопливо, цементную пыль, загрязненный бензином песок.

4 класс – малоопасные отходы. Степень воздействия на окружающую среду и человека низкая. Период восстановления окружающей среды от 3 лет и более после снижения степень воздействия отходов. К этому классу опасности можно отнести: бой кирпича, остатки щебня и арматуры, шпаклевка, куски рубероида, уличный и дорожный мусор, отходы битума и асфальта, обломки мебели, упаковки, остатки пищи, осколки стекла, опилки, отходы пуха и перьев, перепревший навоз и помет птицы, отработанный загрязненный уголь.

5 класс – практически не опасные отходы. Степень воздействия на окружающую среду и человека очень низкая и при оказании воздействия на экологическую систему изменений не происходит. К этому классу опасности можно отнести: дорожный мусор и крупногабаритные отходы, это могут быть мебель и вещи, стекло, бумага, пластмасса, пищевые отходы и твердые бытовые отходы.

В зависимости от класса опасности отходы разделяют по их происхождению. 1, 2 и 3 класс опасности относят к промышленным отходам, образовавшиеся в результате деятельности предприятий и организаций. Отходы 3 и 4 класса относятся к строительным отходам. Отходы этого класса образуются в результате сноса зданий и сооружений, при строительстве зданий. Отходы 4 и 5 класса опасности относятся к твердым бытовым отходам и

твердым коммунальным отходам, которые образуются в результате жизнедеятельности человека в жилых и административных зданиях, на улицах [6–7].

Следует отметить, что вне зависимости от класса опасности отходов возможно нахождение высоко опасного вещества в малоопасных отходах. Попадание высоко опасных веществ в малоопасные отходы осуществляется за счет того, что опасные вещества содержатся в безопасных для окружающей среды и человека предметах. Чаще всего эти вещества содержатся в градусниках, батарейках, люминесцентных лампах и т. д., которые после использования становятся частью твердых бытовых отходов. В результате малоопасные отходы становятся высокоопасными.

#### **4.2. Существующие способы сбора, хранения и переработки твердых бытовых отходов**

Рациональное обращение с твердыми бытовыми отходами предполагает не только их своевременную переработку и утилизацию, а также особое внимание к источникам их генерирования и складирования до того момента, пока специализированные организации начнут работу по транспортировке отходов к месту хранения или переработки с последующей утилизацией. Во всем мире огромное внимание уделяется сбору твердых бытовых отходов. Осуществление грамотного сбора отходов, позволяет снизить затраты на переработку.

К основным способам сбора твердых бытовых отходов в России относятся [5]:

- 1) сбор отходов в контейнеры (для сбора ТБО – объемом от 0,75 до 1,2 куб. м; для сбора КГМ – объемом от 5,0 куб. м и более или на специально отведенных площадках);
- 2) сбор отходов в мусороприемные камеры в зданиях, оборудованных мусоропроводами;
- 3) сбор отходов в специальные пакеты для мусора, мусоровозы с задней загрузкой мусора – для сбора отходов с территорий частных домовладений;
- 4) сбор отходов в другие виды контейнеров;
- 5) сбор отходов в урны для мусора;
- 6) сбор отходов в экоблоки.

Сегодня в России основным способом сбора отходов потребления является контейнерный, без предварительной сортировки. Население выбрасывает отходы в один или несколько контейнеров. Сложившаяся система сбора отходов образовалась в результате следующих факторов: во-первых, Россия имеет в своем составе большие площади свободных земель для захоронения, во-вторых, слабая экономика и распад СССР, которые повлияли на объемы вводимых мощностей по переработки отходов. Вследствие чего в

стране практически отсутствует отдельный сбор – все отходы транспортируют на полигоны для хранения, а объемы переработки оставляют желать лучшего.

Отдельный сбор является ключевым подходом по сбору отходов потребления. Отдельный сбор позволяет на этапе зарождения отходов получать готовую, чистую продукцию, которую можно использовать в дальнейшем для вторичного производства. При отдельном сборе снижаются затраты на переработку. Впервые отдельный сбор отходов был введен в Германии в 1980 годах, а к 1990 году в Германии введена «Двойная система сбора отходов». На практике получается следующее: население обязано сортировать отходы, а производители обязаны платить за утилизацию. Осуществление «Двойной системы» способствовало появлению большого количества контейнеров, а также введение тарифов на вывоз отходов. Тарифы по вывозу отходов сделаны таким образом, что за отсортированный мусор оплата не производится. Вслед за Германией отдельный сбор мусора к концу 1990 годов введен в Швеции. В Швеции настолько озаботились этим вопросом, что утилизацией твердых бытовых отходов достигает 99 %. Отдельный сбор отходов удалось достичь благодаря высокой социальной ответственности, даже в детских садах детей учат, как правильно обращаться с мусором.

В современной России постепенно вводится в регионах отдельный сбор. В основном в тех регионах, где заинтересован перевозчик и есть возможность осуществить подобный проект. Развитию отдельного сбора отходов способствует мусорная реформа, которая стартовала в России в 2019 году и призвана взять под контроль отходы потребления от места возникновения до переработки и утилизации. В каждом регионе появляется региональный (мусорный) оператор, который является связующим звеном между органами власти и организациями, отвечающими за вывоз, переработку и утилизацию отходов. Региональный оператор следит за выполнением работы подконтрольных организаций и ведет отчетность перед органами власти. Отчет регионального оператора содержит объемы перевезенных отходов, количество отходов, отправленных на переработку и утилизацию. Транспортировка отходов во всем мире осуществляется при помощи мусоровозов, которые собирают отходы с жилых и административных районов.

На сегодняшний день в России транспортировка отходов осуществляется на 3 основных объектах:

1. Мусоросортировочный комплекс.
2. Предприятие по утилизации твердых бытовых отходов (основным способом утилизации отходов является сжигание).
3. Полигон для захоронения отходов.

При транспортировке отходов потребления на переработку и утилизацию профильные организации обязаны иметь в своем составе специальную площадку для временного хранения отходов. Накопление отходов – временное складирование отходов (на срок не более чем шесть месяцев) в местах, обустроенных в соответствии с требованиями законодательства в области охраны окружающей среды и законодательства в области обеспечения санитарно-эпидемиологического благополучия населения, в целях их

дальнейшего использования, обезвреживания, размещения, транспортирования. Соблюдение санитарных правил является обязательным для граждан, индивидуальных предпринимателей и юридических лиц. Целью данных правил является снижение неблагоприятного воздействия отходов производства и потребления путем предупреждения их рассеивания или потерь в процессе промежуточного складирования.

Временное накопление каждого вида отходов производства и потребления зависит от их происхождения, агрегатного состояния, физико-химических свойств, количественного соотношения компонентов и степени опасности для здоровья населения и среды обитания человека.

В зависимости от технологической и физико-химической характеристики отходов допускается их временно хранить:

- 1) в производственных или вспомогательных помещениях;
- 2) в нестандартных складских сооружениях (под надувными, ажурными и навесными конструкциями);
- 3) в резервуарах, накопителях, танках и прочих наземных и заглубленных специально оборудованных емкостях;
- 4) в вагонах, цистернах, вагонетках, на платформах и прочих передвижных средствах;
- 5) на открытых приспособленных для хранения отходов площадках.

Накопление и временное хранение промышленных отходов на производственной территории осуществляется по цеховому принципу или централизованно. Условия сбора и накопления определяются классом опасности отходов, способом упаковки с учетом агрегатного состояния и надежности тары [8]. Для хранения отходов 1–3-го классов опасности в зависимости от их свойств необходимо использовать закрытую или герметичную тару:

- металлические или пластиковые контейнеры, лари, ящики и др.;
- металлические или пластиковые бочки, цистерны, баки, баллоны, стеклянные емкости и др.;
- прорезиненные или полиэтиленовые пакеты, бумажные, картонные, тканевые мешки, кули и др.

Отходы производства и потребления 4-го и 5-го классов опасности могут храниться в открытой таре. Не допускается хранение в открытой таре отходов, содержащих летучие вредные вещества.

Временное хранение твердых отходов 4-го и 5-го классов опасности в зависимости от их свойств допускается осуществлять без тары – навалом, насыпью, в виде гряд, отвалов, в кипах, рулонах, брикетах, тюках, в штабелях и отдельно на поддонах или подставках. Тара и упаковка должны быть прочными, исправными, полностью предотвращать утечку или рассыпание отходов, обеспечивать их сохранность при хранении. Тара должна быть изготовлена из материала, устойчивого к воздействию данного вида отхода и его отдельных компонентов, атмосферных осадков, перепадов температур и прямых солнечных лучей. Контейнеры, используемые для хранения отходов производства и потребления, изготавливаются из материалов, обеспечивающих



качественное проведение их очистки и обеззараживания. Емкости, используемые для хранения жидких отходов, должны быть установлены на поддонах, обеспечивающих сбор и хранение всей разлившейся жидкости. Стеклянная тара, используемая для хранения жидких отходов, должна помещаться в деревянные, пластиковые ящики или иметь обрешетку. Стенки ящиков и обрешеток должны быть выше закупоренных бутылей и банок на 5 см.

Размещаемые отходы производства и потребления следует складировать таким образом, чтобы исключить возможность их падения, опрокидывания, разливания, чтобы обеспечивалась доступность и безопасность их погрузки для отправки на специализированные предприятия для обезвреживания, переработки или утилизации. Для временного хранения отходов производства и потребления могут эксплуатироваться специально оборудованные открытые и закрытые площадки. Временное хранение в пределах закрытой площадки осуществляется в случае:

- принадлежности отходов к 1–3-му классам опасности в зависимости от их свойств; необходимости создания особых условий хранения, а также надежной изоляции отходов от доступа посторонних лиц;
- необходимости создания особых условий хранения отходов для сохранения их ценных качеств как вторичного сырья;
- сбора и накопления отходов в непосредственных местах их образования (в цехах, производственных помещениях).

Для организации закрытых площадок временного накопления отходов могут использоваться специально предназначенные для этой цели стационарные складские здания, отдельные помещения или выделенные площади внутри складских и (или) производственных, вспомогательных зданий, а также нестационарные складские здания и сооружения. Чтобы проверить правильность обустройства открытых площадок для временного хранения отходов, вновь откроем СанПиН 2.1.7.1322-03 «Гигиенические требования к размещению и обезвреживанию отходов производства и потребления», где сказано: «При временном хранении отходов в нестационарных складах, на открытых площадках без тары (навалом, насыпью) или в негерметичной таре должны соблюдаться следующие условия:

- временные склады и открытые площадки должны располагаться с подветренной стороны по отношению к жилой застройке;
- поверхность хранящихся насыпью отходов или открытых приемников-накопителей должна быть защищена от воздействия атмосферных осадков и ветров (укрытие брезентом, оборудование навесом и т.д.);
- поверхность площадки должна иметь искусственное водонепроницаемое и химически стойкое покрытие (асфальт, керамзитобетон, полимербетон, керамическая плитка и др.);
- по периметру площадки должна быть предусмотрена обваловка и обособленная сеть ливнеотводов с автономными очистными сооружениями в соответствии с техническими условиями;

– поступление загрязненного ливнестока с этой площадки в общегородскую систему дождевой канализации или сброс в ближайшие водоемы без очистки не допускается».

Временное хранение отходов производства и потребления должно осуществляться в соответствии с требованиями Правил пожарной безопасности в Российской Федерации (ППВ 01-03), утвержденных приказом МЧС России от 18.06.2003 № 313. Площадка, на которой осуществляется временное хранение отходов производства и потребления, обладающих пожароопасными свойствами, должна быть оборудована первичными средствами пожаротушения. Предельное количество временного накопления отходов производства и потребления, которое допускается размещать на территории природопользователей, определяется на основе баланса сырья и материалов в соответствии с необходимостью формирования транспортной партии отходов для их вывоза, с учетом компонентного состава отходов, их физических и химических свойств, агрегатного состояния, токсичности и летучести содержащихся вредных компонентов и минимизации их воздействия на окружающую среду. Временное хранение отходов производства и потребления должно осуществляться в условиях, исключающих превышение нормативов допустимого воздействия на окружающую среду, в части загрязнения поверхностных и подземных вод, атмосферного воздуха, почв прилегающих территорий, не должно приводить к нарушению гигиенических нормативов и ухудшению санитарно-эпидемиологической обстановки на данной территории. Люминесцентные лампы (1-й класс опасности) необходимо временно хранить в крытом помещении, недоступном для посторонних, желательно с ровным кафельным либо металлическим полом, в специальных контейнерах, желательно металлических.

Не допускается:

- хранение ламп под открытым небом;
- хранение ламп без тары;
- хранение ламп в мягких картонных коробках, наваленных друг на друга;
- хранение на фунтовой поверхности; передача ламп в какие-либо сторонние организации, кроме специализированных по переработке данного вида отходов.

Аккумуляторы свинцовые, отработанные, неповрежденные с не слитым электролитом (2-й класс опасности) следует хранить в крытом помещении, недоступном для посторонних, в штабелях либо на стеллажах.

Не допускается хранение аккумуляторов под открытым небом, на фунтовой поверхности, также не допускается передача аккумуляторов в какие-либо сторонние организации кроме специализированных по переработке данного вида отходов.

Отработанные масла (3-й класс опасности) накапливаются непосредственно в цехах и должны храниться в металлических или в пластиковых бочках, канистрах, установленных на металлических поддонах. Подразумевается обязательно раздельное хранение различных видов масел (индустриальных, моторных, трансмиссионных и т. д.) в рамках требований

перерабатывающих предприятий. Конечное хранение отходов до их сдачи на специализированное предприятие должно осуществляться в специальных цистернах, установленных на площадке с водонепроницаемым покрытием, имеющей бортики, желательно огороженной, обеспеченной удобными подъездными путями. В обязательном порядке предусматривается надежная водонепроницаемая кровля.

Не допускается переполнение емкостей для хранения масла и излитие его на рельеф, попадание воды внутрь емкостей для хранения масла.

Металлолом (5-й класс опасности) должен храниться на площадке с твердым покрытием, желательно огороженной, имеющей бортики, обеспеченной удобными подъездными путями.

Металлическую стружку следует хранить в специальных металлических контейнерах, установленных на площадке с твердым покрытием, желательно огороженной, имеющей бортики, обеспеченной удобными подъездными путями. В случае если стружка загрязнена нефтепродуктами, эмульсией и т. п., контейнеры должны быть снабжены крышками.

Мусор от бытовых помещений организаций несортированный (4-й или 5-й класс опасности) должен храниться в специальных металлических контейнерах, установленных на имеющей бортики площадке с твердым покрытием, желательно огороженной с трех сторон сплошным ограждением, обеспеченной удобными подъездными путями. Не допускается переполнение контейнеров (должен быть обеспечен своевременный их вывоз) и поступление в контейнеры для мусора отходов, не разрешенных к приему на полигоны ТБО, в особенности отходов 1-го и 2-го классов опасности.

Отработанные шины и камеры (4-й класс опасности) как отходы представляют опасность, прежде всего, как элемент замусоривания территории, поэтому требования к их хранению сводятся к недопущению попадания их в окружающую среду. Желательно хранение их на огороженной крытой площадке с твердым покрытием, в штабелях либо на стеллажах.

Промасленная ветошь (3-й или 4-й класс опасности) накапливается в металлических ящиках с крышкой на удалении от других горючих материалов и источников возможного возгорания (хранение в цехе не должно превышать недельную норму образования). Еженедельно ветошь необходимо убирать из помещения в место хранения (металлический ящик, расположенный на расстоянии от строений с точки зрения противопожарной безопасности) и вывозить на обезвреживание в соответствии с установленным лимитом в специализированную организацию.

Не допускается:

- поступление промасленной ветоши в контейнеры для других отходов;
- поступление посторонних предметов в контейнеры для сбора промасленной ветоши [9].

К полигону для хранения твердых бытовых отходов предъявляют следующие требования.

1. Участок для размещения и устройства полигона твердых бытовых отходов должен отводиться в соответствии с утвержденными генеральными

планами или проектами планировки и застройки населенных пунктов, пригородных зон и должен гарантировать санитарно-эпидемиологическую безопасность для здоровья населения и отвечать требованиям санитарно-эпидемиологических правил, экологических норм и иных нормативных правовых актов государства и национальных субъектов права в области охраны здоровья человека и окружающей среды.

2. Обустройство, паспортизация и эксплуатация полигона твердых бытовых отходов должны осуществляться в соответствии с законодательством государства.

3. Собственники полигонов, а также лица, во владении или в пользовании которых находится полигон, обязаны иметь паспорта, включающие регламенты и режимы работы полигонов, инструкции по порядку и условиям приема и сортировки твердых бытовых отходов, и осуществлять контроль за составом и распределением отходов в работающих частях полигонов, вести круглосуточный учет и обеспечивать соблюдение технологических циклов по изоляции и обезвреживанию поступающих на полигоны твердых бытовых отходов.

Собственник полигона обязан организовать управление полигоном таким образом, чтобы в течение всего цикла его существования обеспечивать предотвращение или максимально возможное отрицательное воздействие полигона на окружающую среду, в особенности на поверхностные и подземные воды, почву и воздух, в том числе и на глобальном уровне (включая парниковый эффект), на здоровье человека в результате действий, связанных с захоронением отходов.

4. На полигоны твердых бытовых отходов должны приниматься отходы из жилых домов, общественных зданий и учреждений, предприятий торговли и общественного питания, уличный и садово-парковый смет, обеззараженные отходы из лечебно-профилактических учреждений, строительный мусор и другие отходы, которые не могут быть использованы в качестве вторичных ресурсов.

5. Обезвреживание твердых, жидких и пастообразных бытовых отходов, содержащих примеси радиоактивных веществ, осуществляется на специальных полигонах в соответствии с требованиями санитарно-эпидемиологических правил, экологических норм и иных нормативных правовых актов государства в области обеспечения радиационной безопасности.

6. На территории полигона твердых бытовых отходов не разрешается открытое сжигание отходов, предусматриваются меры по предупреждению и исключению самовозгорания отходов, очистке образующегося фильтрата, утилизации свалочного газа.

7. Для захоронения на полигонах твердых бытовых отходов не допускается прием трупов павших животных и конфискатов боен мясоперерабатывающих комбинатов.

8. Прием вторичного сырья, включая отработанные автомобильные покрышки, аккумуляторные батареи, упаковочные отходы для захоронения на полигонах не допускается.

9. Не допускается смешивание отходов с целью выполнения критериев приема отходов на полигоны с целями захоронения.

10. Не допускается прием отходов, которые не были подвергнуты предварительной обработке с целью снижения негативного воздействия на окружающую среду. Это условие не относится к отходам, для которых такая переработка технически невыполнима [10].

Переработка твердых бытовых отходов заключается в извлечении полезных вторичных фракций из общего объема отходов. Перечень извлекаемых полезных вторичных фракций описан в пункте 1. На данный момент в стране перерабатывается от 6 до 10 % твердых бытовых и коммунальных отходов. Низкий объем перерабатываемых отходов по сравнению с ведущими странами мира вызван, в первую очередь, поздними реформами в области обращения с отходами. Не высокий объем мощностей по сортировке отходов. Практически все отходы, производимые в нашей стране, отправляются на захоронение на полигоны для отходов. На сегодняшний день существует множество различных мусоросортировочных комплексов [11].

Все сортировочные комплексы по способу сортировки подразделяются на три группы: ручная сортировка, полуавтоматическая и автоматическая сортировка. Использование ручной сортировки является одним из основных видов сортировки в России, несмотря на низкий сортировочный КПД в 3 %. Одним из главных факторов, влияющих на выбор ручной сортировки, является низкие капитальные вложения на начальном этапе при построении мусоросортировочной линии. К недостаткам ручной сортировки можно отнести низкий сортировочный КПД, а также количество отбираемых фракций. В основном отбираются основные крупнодисперсные фракции, такие как: черные и цветные металлы, бумага и картон, пластиковые бутылки, полиэтиленовые пакеты, стекло. После ручной сортировки остается большой объем не сортируемых мелких фракций, которые в дальнейшем идут на сжигание или на полигон для хранения.

Полуавтоматическая сортировка твердых бытовых отходов включает в себя элементы ручной сортировки с использованием средств автоматической сортировки отходов. Зачастую используемое оборудование выполняет несколько функций. Разделение на фракции и удаление металлов. Прессование извлеченных вторичных фракций. Сортировочный КПД таких установок достигает от 10 до 15 %. К достоинствам описываемой мусоросортировочной линии можно отнести высокий сортировочный КПД, а также количество и объем отбираемых вторичных фракций. К недостаткам – более высокие капитальные вложения по сравнению с ручной линией сортировки.

Автоматическая линия сортировки твердых бытовых отходов является самой эффективной линией по сравнению с вышеописанными. Применение полностью автоматизированного комплекса позволяет достигать высоких результатов. Сортировочный КПД данной линии 99 %. Высокий сортировочный КПД достигается за счет использования современных технологий, которые позволяют определить тип, вид и химические свойства отходов до момента совершения операции по сортировке над мусором.

Средства автоматического измерения позволяют решать сложные задачи по сортировке отходов. Сортировочные линии с использованием автоматической сортировки позволяют сортировать отходы на сотни фракций. Скорость принятия решений, а также количество выполняемых операций в секунду – все это решает огромную роль в сортировке [12]. Стоит также учесть, что на полностью автоматизированной линии используется ручная сортировка, но ее объем настолько мал, что на основной результат она не влияет. Безусловно, использование современных технологий позволяет достигать немислимых результатов, но цена использования высока. Позволить себе мусоросортировочный комплекс подобного образца могут не многие. В основном комплексы подобного типа используют крупные организации и государственные предприятия. В своем составе, вне зависимости от типа сортировочной линии, они имеют следующий алгоритм построения сортировки: прием отходов, подача на конвейер, разделение на фракции, извлечение фракций. После извлечения полезных вторичных фракций из общего потока твердых бытовых отходов происходит их прессование и подготовка к отправке на предприятие по переработке. Также происходит подготовка к отправке на полигон или на уничтожение не сортируемых фракций, в основном это фракции, которые утратили свой потенциал к вторичному использованию.

Сегодня во всем мире сортировка отходов является отличным способом заработать. Объем производимых отходов растет с каждым годом, а перерабатываемые мощности практически не увеличиваются. Данная тенденция негативно складывается в России, что выражается в большом количестве мусорных полигонов и несанкционированных свалок.

#### **4.3. Совместная утилизация твердых древесных отходов и отходов целлюлозно-бумажного производства**

Как известно, в процессе деревообработки образуется большое количество древесных отходов, прежде всего, опилок и коры, которые впоследствии сжигаются.

На целлюлозно-бумажных комбинатах также образуется большое количество твердых отходов, а в случае переработки макулатуры – и смешанных бумажных отходов, дополнительно содержащих синтетические полимеры, которые в ряде случаев выделяют в системах очистки сточных вод в виде не утилизируемого скопа.

Одним из наиболее массовых видов таких сложных отходов являются отходы упаковки типа тетрапак, которая может быть отнесена к целлюлозным композиционным материалам (ЦКМ). Так, на конец 2018 года общемировой объем производства многослойной упаковки для жидких пищевых продуктов составил более 200 млрд штук (порядка 40 млн т). При этом лишь четверть произведенной упаковки подверглась вторичной переработке. Это связано с тем, что на сегодняшний день в мире просто не существует полностью экологически безопасных и экономически целесообразных технологий комплексной утилизации отходов такого многослойного бумажного ламинированного материала.

В России ежегодно образуется более 280 тыс. т отходов упаковки типа тетрапак, а переработано из них, например, в 2017 году, было всего 5 тыс. т, что соответствует 3 %. В том же году Гринпис задал мировой экологический тренд на сокращение производства и потребления полиэтилена. Таким образом, возможность повторного использования и переработки упаковки – важнейшие тенденции, которые будут продолжаться в прогнозном периоде.

Для совместной переработки и древесных отходов, и смешанных бумажных отходов с покрытиями из синтетических полимеров представляет интерес инновационная технология производства древесных и древесно-угольных брикетов.

По сравнению с обычным сжиганием дров брикеты и пеллеты имеют явное преимущество, в том числе и по теплоте сгорания, что видно из представленной ниже таблицы (табл. 7).

Таблица 7 – Тепловые характеристики различных видов топлива

Вид топлива	Теплота сгорания (МДж/кг)	Калорийность (ккал/кг)	Калорийность (кДж/кг)	Калорийность (кВт-ч/кг)	Плотность (кг/м <sup>3</sup> )	Удельный вес (кг/дц <sup>3</sup> )	Влажность %	% золы	% селеры	Энергетическая плотность (ГДж/м <sup>3</sup> )
Каменный уголь	15–25	4500–5200	18828–21756	5,23–6,04	1300–1500	1,3–1,5	1–12	10–35	1–3	–
Бурый уголь	14–22	4000–4300	16736–17991	4,65–4,99	1200–1500	1,2–1,5	30–40	10–35	1–3	–
Дрова (береза)	10	2000	8368	2,32	650	0,65	12	2	0	9,8
Пеллеты древесные	18,4	4800–5000	20083–20920	5,58–5,81	650–1000	0,65–1	8–12	2,5	0,1	12–18
Древесная щепа	10	4500	18828	5,23	290	0,29	50–60	2	0	2,9
Брикет из опилок лиственницы	18–19	4300–4700	17991–19664	5–5,46	1300	1,3	2–4	1–3	0	26,0
Торфобрикеты	14,9	3200	13389	3,72	400–650	0,4–0,65	1–18	23	1–3	–
Природный газ	35–38 МДж/м <sup>3</sup>	7600 Ккал/м <sup>3</sup>	31798 КДж/м <sup>3</sup>	8,84	0,68–0,85	0,0068–0,0085	–	0	0	–
Древесно-угольный брикет	34,3	8192	34275	9,53	798	0,798	1,8	1–4,5	0–0,45	27,4
Костра конопли	18,0–18,5	4299–4418	17987–18484	4,99–5,14	113–170	0,113–0,170	4–5	–	0	2,0–3,2

Преимущества древесных топливных брикетов в сравнении с другими видами твердого топлива:

1. Теплотворная способность брикетов 5–5,5 кВт·ч/кг, т. е. выше, чем у дров, и сопоставима с пеллетами и отдельными видами углей.

2. В отличие от дров брикеты не нуждаются в предварительной сушке.

3. Топливные брикеты горят с минимальным количеством дыма, не «стреляют» и не искрят.

4. Длительная продолжительность горения брикетов: по сравнению с обычными дровами закладку в печь можно производить в несколько раз реже.

5. Постоянная температура на всем протяжении горения древесных брикетов (при большой продолжительности горения).

6. Низкая зольность (0,5–1,0 %). После сгорания топливных брикетов остается пепел, а не угли, как при сжигании других твердых видов топлива.

7. Брикеты требуют меньше места для складирования и перевозки: один комплект брикетов весом 1 т (около 1 м<sup>3</sup>) эквивалентна 3–4 м<sup>3</sup> дров. Соответственно существенно снижаются затраты на транспортировку и хранение топлива.

8. Удобная расфасовка (в основном по 10 кг) позволяет выгружать и складывать их вручную в гараже, подвале и даже в кладовке или на балконе квартиры.

9. Стоимость брикетов ниже стоимости пеллет. К сырью для производства брикетов нет таких жестких требований, как к пеллетному (в частности, по содержанию коры), брикетирующие линии дешевле, и, соответственно, ниже себестоимость производства.

10. Котлы и камины для брикетов просты в обслуживании, не требуют специально оборудованных мест для складирования и автоматической подачи топлива, а потому дешевле пеллетных.

11. Кроме того, в отличие от пеллет они могут использоваться и в обычных печах любого типа. Брикетами можно заменять другие виды твердого топлива (уголь, дрова) без соответствующей модернизации котлов и печей. Брикеты всегда можно заменить на дрова, а пеллеты – нет. Именно поэтому производители пеллетных котлов в последнее время включают в линейку своей продукции комбинированные котлы, которые могут работать как на пеллетах, так и на дровах и брикетах.

12. Выброс оксида углерода в атмосферу при сгорании топливных брикетов минимален.

13. Возможность длительного хранения брикетов без ухудшения их качественных характеристик, отрицательного влияния на окружающую среду и пожаро- и взрывобезопасность; улучшение условий труда обслуживающего персонала котельных.

Древесные топливные брикеты – экологически чистый продукт: производятся без химических добавок и склеивающих веществ, из натуральных, необработанных никакими химическими препаратами древесных отходов. Связующим веществом является лигнин, который содержится в самой древесине. Брикеты легче подавать в топочную камеру по сравнению с дровами



и углем. Они хорошо разгораются, горят долго и равномерно. Брикетты имеют плотность в среднем в 2 раза выше дров, благодаря чему занимают меньше места, отлично подходят для промышленных и бытовых нужд. Это удобный и чистый продукт, позволяющий экономить площадь хранения и иметь возможность держать необходимый запас топлива непосредственно в котельной. При сжигании брикетты не оказывают негативного воздействия на окружающую среду и атмосферу отапливаемого помещения. Практически не выделяют дыма, копоти, угарного газа и других вредных веществ, в отличие от дров или угля.

Если с утилизацией древесных отходов все предельно просто, то со смешанными отходами ЦБП дела обстоят намного сложнее. Как известно, использование вторичного волокна (макулатуры) в мире уже несколько лет назад превысило использование первичного волокна. И если с материалами, полученными из вторичных волокон и из смеси первичного и вторичного волокон, особых проблем нет, то ситуация с отходами реальной макулатуры, содержащей синтетические полимеры, возникают дополнительные проблемы. Во многих видах таких отходов целлюлозно-бумажной промышленности содержатся вредные для здоровья человека и окружающей среды в целом вещества. Поэтому для отходов этой категории часто используется такой способ, как захоронение на полигонах, что, несомненно, пагубно влияет на экологию, т. к. они, как правило, не обладают биоразлагаемостью.

Обычно для получения ЦКМ используются такие много тоннажные полимеры, как полиэтилен (ПЭ), полипропилен (ПП), полиэтилентерефталат (ПЭТ или ПЭТФ), сжигание которых в составе, например, брикеттов, не вызывает проблем. Однако, как известно, в некоторых случаях используется и поливинилхлорид (обои с «виниловым», покрытием, обложки общих тетрадей и др). В таких отходах при их сжигании возможно появление соединений, которые при высокотемпературном сжигании выделяют токсичные вещества, как например диоксины и фураны.

Диоксин – один из самых коварных ядов, известных человечеству. Он является наиболее сильным антропогенным ядом, отличается высокой стабильностью, долго сохраняется в окружающей среде и организмах, переносится по цепям питания и, таким образом, длительное время воздействует на живые организмы. Даже в количествах, на несколько порядков меньших дозы, вызывающей острое отравление (для человека минимальная токсичная доза составляет 0,5–1 мкг/кг), диоксин способствует превращению многих веществ синтетического и природного происхождения в опасные для организма яды.

Природа диоксинов изучена не до конца. Они образуются при высоких температурах (500–1200 °С) из углеводов в присутствии галогенов и имеют обратимость процесса. На данный момент изучены только хлористые диоксины, содержащиеся, например, в поливинилхлориде. Исходя из этого, сложность утилизации отходов ЦБП возрастает, т. к. нередко можно встретить хлорсодержащие вещества в процессах отбеливания целлюлозы с помощью хлора и переработки макулатуры.

Для решения данной проблемы предлагается объединить древесные отходы и твердые отходы ЦБП (кородревесные отходы, опилки, лигнин, избыточный активный ил после обработки сточных вод, минеральные отходы процесса сортировки целлюлозы, шламы систем регенерации сульфат целлюлозных заводов) в единый топливный брикет с определенными концентрациями двух видов отходов. Таким образом, большинство таких отходов можно утилизировать методом высокотемпературного пиролиза при определенной температуре с предотвращением процесса образования диоксинов.

Технология производства топливных брикетов способствует изменению релаксационного состояния полимерных компонентов древесины, обеспечивается энергосбережение на всех этапах производства и на всем протяжении жизненного цикла древесных брикетов, благодаря чему сокращаются выбросы парниковых газов. Используемая комбинированная технологическая линия, представляет собой каскад реакторов, различающихся по гидравлическим (аэродинамическим) режимам, тепловым режимам и по цикличности работы. Процесс включает непрерывные быстрые стадии – экструзию, периодические медленные стадии – стадии пиролиза, релаксации и циркуляционные стадии – аэродинамическое (вихревое) хрупкое разрушение в регулируемой паровоздушной среде, пиролиз и активацию в циркулирующей парогазовой среде. Линия включает в себя реакторы, работающие в режиме «идеального смешения» – аэродинамическая сушка/измельчение, «идеального вытеснения» – экструзию, камеру карбонизации, работающую в периодическом циклическом режиме с высокоинтенсивной циркуляцией газовой фазы регулируемого состава. При переработке комбинированных отходов на стадии карбонизации при сжигании пиролизных газов целесообразно установить специальную систему дожигания, например, плазменное и, при необходимости, осуществлять закалку уходящих газов.

Как упоминалось выше, при утилизации топливных брикетов, состоящих в том числе из отходов целлюлозно-бумажной промышленности, в которых могут содержаться хлористые элементы, такие как поливинилхлорид, есть вероятность выделения, хоть и минимального, объема диоксинов. В случае выброса диоксинов в атмосферу, количество которых превышает предельно допустимую концентрацию (ПДК), предлагается дожигать дымовые газы, используя электроплазменные технологии.

Под электроплазменными технологиями принято понимать процессы широкого класса направленности, в основе которых лежит применение генератора низкотемпературной плазмы – плазмотрона. Главное в этой технологии – ионизованный газ, плазма, температура которой может варьироваться от 2 тысяч до 6 тысяч градусов в зависимости от решаемой задачи. Принципиально важно, что в таком реакторе нет горения, отходы не сжигаются, а подвергается газификации. А раз нет ни горения, ни кислорода – отходы не сжигаются, следовательно, при такой температуре нет условий для образования диоксинов, фуранов, оксидов азота, диоксида серы, углекислого газа и прочих вредных выбросов. Кроме того, плазма буквально разрывает на

части не только отдельные частицы, но и молекулы, поэтому в процессе переработки отходов практически не создается твердых микрочастиц. Тем самым становится очевидной сфера применения таких технологий – переработка отходов, являющаяся на данный момент одной из самых актуальных задач в сфере экологии. Эффективное внедрение плазменных технологий в производства по переработке отходов требует оптимальных решений с учетом критериев производительности, себестоимости и безопасности процесса, а также качества достигаемого результата.

В плазмохимическом реакторе при высоких температурах вещества разлагаются до молекулярного, атомарного и ионизированного состояния с последующим образованием синтез-газа, который является аналогом природного газа. Возможность регулирования состава плазмообразующего газа, давления и высоких температур позволяет достигать эффективности переработки в 99,9 %. Такими методами можно обезвреживать органические, фтор-, хлор-, фосфор- и серо-органические вещества, металлоорганику, неорганические материалы. Особенно полезны эти методы при утилизации трудногорючих и негорючих соединений.

Использование данных технологий позволит минимизировать вредоносное влияние отходов ЦБП и снизить количество отходов, захороненных на полигонах, а также позволит использовать синтез-газ для получения тепловой и электрической энергии, повысит экологическую и экономическую эффективность предприятий ЦБП

#### **4.4. Ликвидация твердых коммунальных отходов в энергетической установке малой мощности**

Существующая проблема переработки и утилизации твердых коммунальных отходов является одной из главных экологических проблем современной России. Актуальная проблема образовалась в результате малого количества мусороперерабатывающих комплексов и заводов по утилизации отходов. Вследствие чего, до 80 % образующихся твердых коммунальных отходов отправляют на захоронение на полигоны. Обладая большим, свободным территориальным пространством, решение об увеличении количества перерабатываемых и утилизируемых отходов откладывалось на долгие годы, что способствовало созданию огромного количества полигонов для хранения отходов. Недобросовестные граждане в целях личной выгоды отгружали и отгружают до сих пор отходы разного рода в любых удобных и скрытых местах, создавая беспрецедентное количество несанкционированных свалок по всей стране. По предварительным подсчетам, только учтенных несанкционированных свалок в нашей стране на 2018 год составило более 55 тыс.

Представленные данные, наглядно демонстрируют важность и актуальность проблемы несанкционированных свалок. В России разработан

национальный проект «Экология». Одним из главных пунктов которого является решение проблемы несанкционированных свалок. К тому же в нашей стране действует мусорная реформа, которая должна взять под контроль все отходы производства и потребления, от места образования отходов до конечной переработки. Применение современных технологий переработки и утилизации твердых коммунальных отходов заставляет развиваться науку и технику, что является актуальным и перспективным в наше время. Сложность процесса переработки и утилизации отходов способствует поиску новых подходов в данном направлении.

Цель исследования заключается в описании и разработке современной, мобильной установки, способной перерабатывать и утилизировать твердые коммунальные отходы, вдобавок достигая отсутствие хвостовых отходов, в процессе переработки за счет полного уничтожения всех неопасных отходов в котельном агрегате при неоднородном составе топлива. Конечным итогом работы мобильной установки считается:

1. Полное уничтожение несанкционированной свалки.
2. Получение полезных вторичных фракций за счет сортировки отходов.
3. Отбор органоминеральной части, включая опасные компоненты.
4. Производство тепловой и электрической энергии в зависимости от компоновки мобильной установки, для потребителя.

Ежегодно в России образуется более 70 млн т твердых коммунальных отходов, из которых 10 млн т образуется в Санкт-Петербурге и Ленинградской области. Общее количество образованных твердых коммунальных отходов за последние 10 лет представлены на рис. 19.

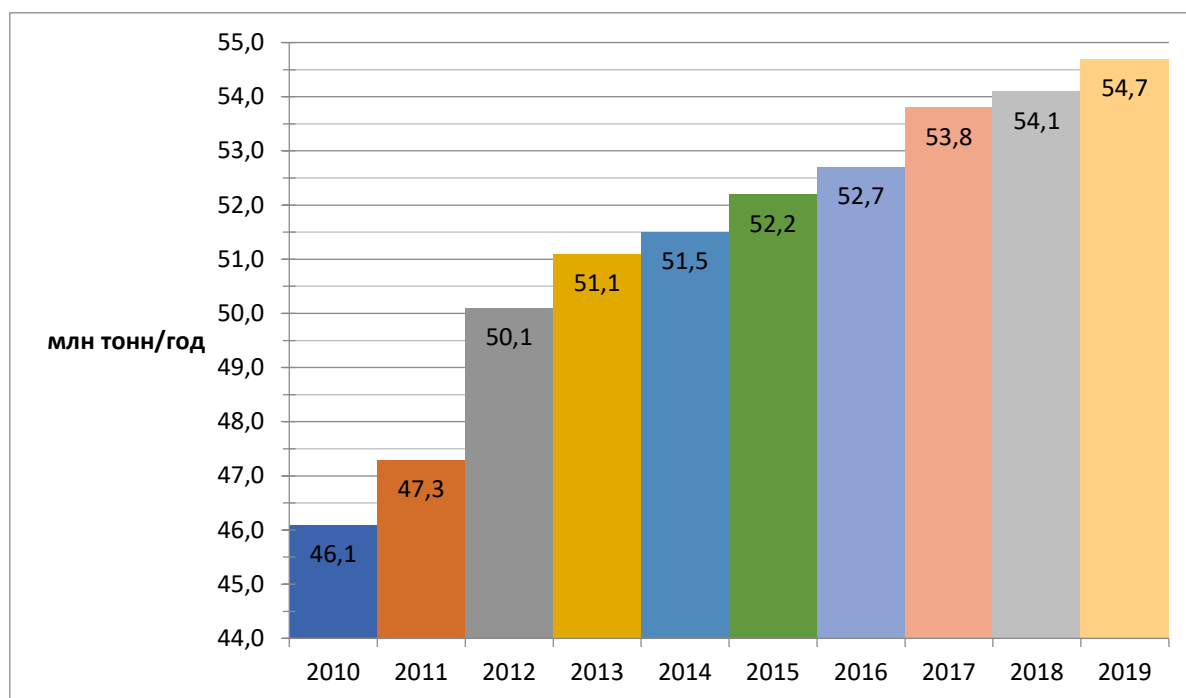


Рис. 19. Ежегодное образование ТКО в России в период с 2010–2019 гг.

Количество перерабатываемых и утилизируемых отходов в России колеблется от 10 до 15 % в год, что является крайне низким показателем. Например, Австрия перерабатывает до 63 % отходов, Швеция – до 33 % отходов. Небольшое количество перерабатываемых отходов обусловлено недостатком сортировочных и перерабатывающих комплексов, которых по предварительным данным порядка 290 единиц на 2020 год. На основании чего, все твердые коммунальные отходы транспортируются на полигоны для хранения. Количество образуемых несанкционированных свалок зависит от региона. Например, на территории Санкт-Петербурга и Ленинградской области расположено более 3 тыс. учтенных несанкционированных свалок. Соотношение количества выявленных свалок и ликвидированных в Санкт-Петербурге за последние годы представлено на рис. 20.

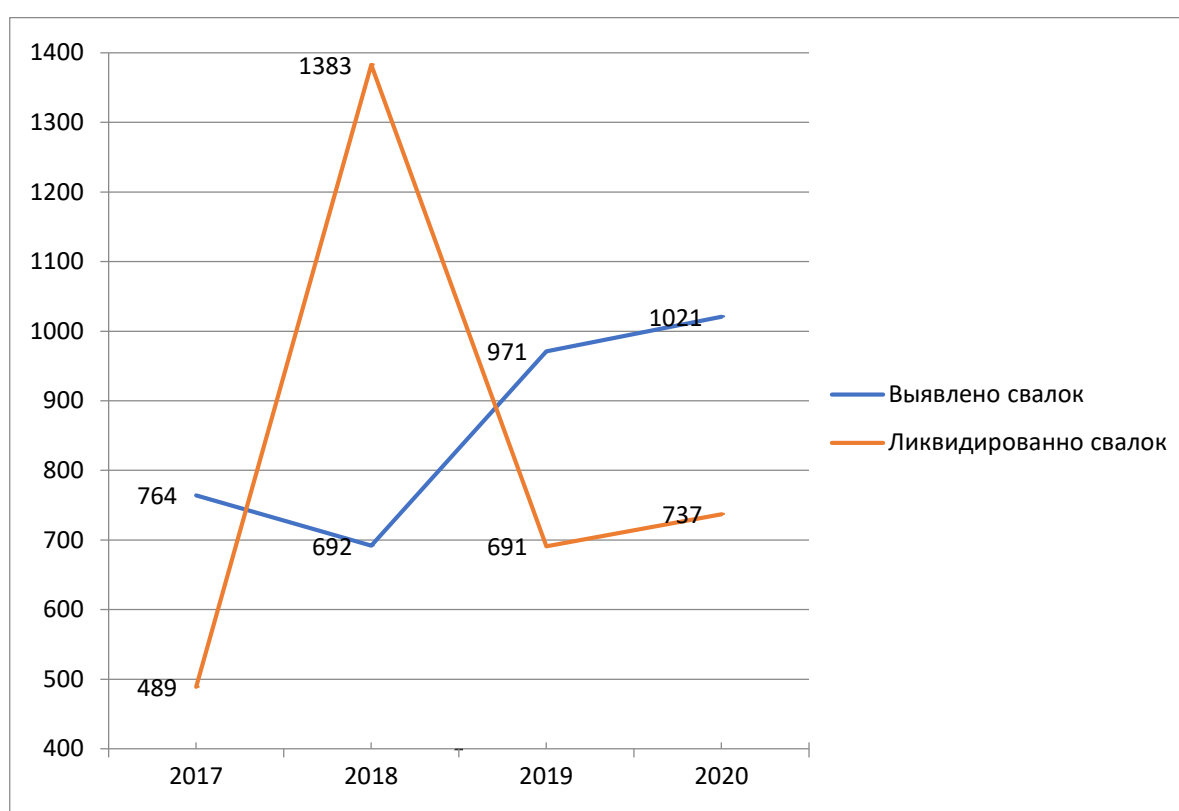


Рис. 20. Соотношение количества выявленных и ликвидированных свалок

В Санкт-Петербурге и Ленинградской области за 2020 год ликвидировали несанкционированные свалки общим объемом свыше 600 тыс. м<sup>3</sup>, что в 7 раз больше, чем за 2019 год.

Главной стратегической задачей по переработке и утилизации отходов является кардинальное изменение обстановки, путем снижения количества поступающих отходов на полигоны и несанкционированные свалки. Произведенный анализ научной литературы, научных работ установил, что работа в направлении переработки и утилизации несанкционированных свалок

с использованием мобильных установок не ведется. Исходя из вышеизложенного, поставлена задача – создание современного, мобильного, энергетического комплекса, для переработки и утилизации твердых коммунальных отходов, расположенных на несанкционированных свалках.

Цель создания мобильной установки заключается в:

- 1) своевременном и оперативном уничтожении твердых коммунальных отходов;
- 2) получении полезных вторичных фракций;
- 3) полном уничтожении хвостовых отходов;
- 4) производстве тепловой и электрической энергии в зависимости от компоновки с передачей в муниципальные тепловые и электрические сети.

Первые установки подобного типа использовались на Чернобыльской АЭС при ликвидации аварии 1986 года. Мобильные установки использовались для уничтожения окружающих элементов и отходов, которые были заражены радиацией. Принцип работы установок тех лет заключался в слоевом сжигании подаваемых отходов на колосниковую решетку, с выбросом продуктов сгорания в атмосферу. Установки подобного типа работают и в Финляндии в деревообрабатывающей промышленности. В процессе создания данных установок использовался советский опыт конструирования установок 1986 года производства. В процессе работы мобильной установки сжигаются древесные стружки и опилки. Теплота сгорания древесных отходов используется для нагрева воды и передачи теплоносителя в тепловую сеть. В современном мире существует множество различных видов мобильных установок: от стандартного прицепа для легкового автомобиля, до автопоезда. Каждая из установок уникальна по своему технологическому оборудованию и назначению. В качестве примера мобильных установок можно отнести следующие:

- 1) мобильную установку для утилизации медицинских отходов в Польше;
- 2) мобильный инсинератор для сжигания трупов животных в Корее;
- 3) мобильный мусоросжигательный автомобиль в Японии;
- 4) мобильные установки для утилизации отходов добычи и переработки нефти;
- 5) мобильная установка, предназначенная для переработки ртульсодержащих отходов.

Перечисленные выше мобильные установки имеют конструктивный схожий состав оборудования и технологическую линию утилизации. Работа установок данного типа ведется в строго заданном режиме, говоря иными словами, утилизируют один вид отходов – узкий диапазон утилизации.

На сегодняшний день мобильных установок для переработки и утилизации твердых коммунальных отходов, расположенных на несанкционированных свалках, не существует, следовательно, основная задача поставлена верно.

Ключевое отличие предлагаемой мобильной установки от перечисленных выше – наличие возможности переработки и утилизации в широком диапазоне при работе с неоднородным составом отходов.

Общий вид мобильной установки представлен на рис. 21.

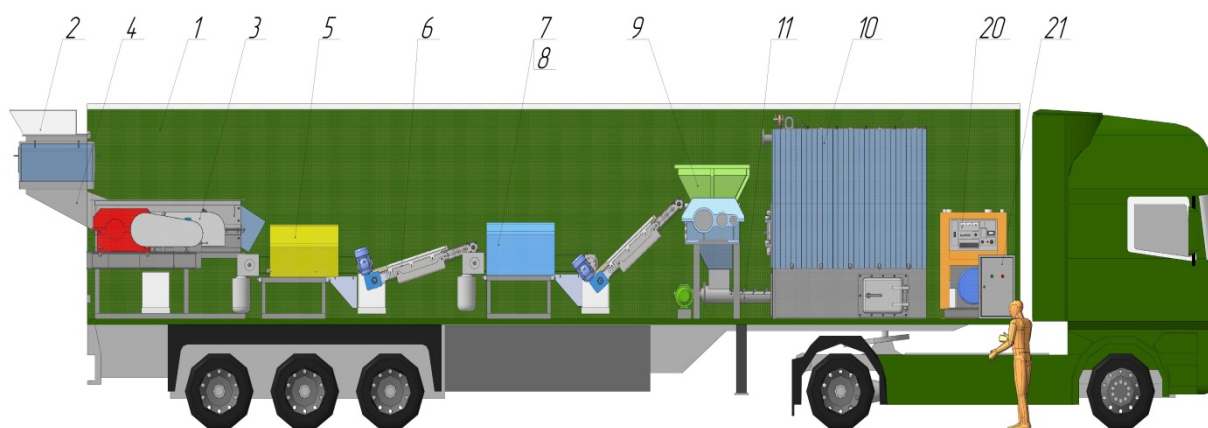


Рис. 21. Общий вид мобильной установки

1 – металлический контейнер; 2 – разрыватель пакетов; 3 – роторный валковый сепаратор; 4 – смежная шахта; 5 – оптикомеханическая сортировка; 6 – ленточный транспортер; 7 – металлоуловитель; 8 – стеклоуловитель; 9 – шредер; 10 – котельный агрегат; 11 – шнековый питатель; 20 – дизель генератор; 21 – щит управления

Мобильная установка для переработки и утилизации твердых коммунальных отходов размещается на автопоезде. Использование автопоезда позволяет перемещать весь комплекс к месту переработки и утилизации. В процессе компоновки узлов установки необходимо учитывать максимальные габариты транспортного средства. Максимальные габариты установки совместно с транспортным средством не должны превышать: ширину 2 м 50 см, высоту 4 м, длину 20 м. Обеспечение бесперебойной работы установки требует наличия следующих узлов:

1. Узел сортировки твердых коммунальных отходов.
2. Узел утилизации твердых коммунальных отходов.
3. Узел производства тепловой и электрической энергии.
4. Узел передачи тепловой и электрической энергии потребителю.

Подробное описание внешнего вида, технологической схемы и принципы работы мобильной установки представлены в литературе [11, 12, 13, 14].

Сортировка твердых коммунальных отходов занимает одно из главных мест при выборе компоновки установки. От качества сортировки зависит процесс работы. Задача узла сортировки заключается в извлечении полезных вторичных фракций из общего потока твердых коммунальных отходов для вторичного использования, а также извлечение непригодных для горения фракций металла и стекла. В основном из общего потока твердых коммунальных отходов удаляется пластмассовые изделия, полиэтилен, стекло, металлы и мелкофракционный состав размером менее 16 мм. На рис. 22 представлен морфологический состав ТКО в Санкт-Петербурге.



Рис. 22. Диаграмма морфологического состава ТКО в Санкт-Петербурге

В результате использования сортировочного комплекса мобильной установки достигается полное извлечение полезных вторичных фракций и органоминеральной смеси. Второстепенной задачей сортировочного комплекса является недопущение попадания опасных отходов 1–3 класса опасности в котельный агрегат, путем извлечения опасных отходов из общего потока. В основном это происходит на стадии сепарирования фракций в роторном валковом сепараторе. непригодные для вторичного использования твердые коммунальные отходы измельчаются и поступают в узел утилизации твердых коммунальных отходов. В качестве топлива используется бумага, картон, упаковки из картона, текстиль, кожа, древесина и древесные изделия (мебель). Утилизации ТКО осуществляется за счет котельного агрегата слоевого типа с колосниковой решеткой. Котельный агрегат мобильной установки является сердцем установки. Использование специального котельного агрегата, в котором организован процесс горения твердых бытовых отходов, позволяет полностью сжигать отходы неоднородного состава и отходы, утратившие свою жизнеспособность, обеспечивая выбросы в атмосферу с ПДК. Для очистки дымовых газов и поддержания вредных выбросов в допустимых значениях предусмотрен циклон и скруббер. Необходимо отметить, что в установке данного типа сжигаются отходы 4–5 класса опасности. В мобильной установке существует возможность перерабатывать и утилизировать некоторые виды отходов 3 класса опасности, в частности строительный мусор.



Результаты проведения предварительных расчетов котельного агрегата и всей установки в целом представлены в табл. 8.

Таблица 8 – Результаты проведения предварительных расчетов котельного агрегата и всей установки в целом

Наименование	Значение
Производительность (Мощность) установки	1 МВт
Расход топлива на котел	200 кг/ч
Теплота сгорания топлива	20 МДж/кг
Количество перерабатываемых отходов	10 т/ч
Температура теплоносителя	150 °С
Расход воды через котел	10,6 т/ч
Температура уходящих газов	200 °С
Габариты установки	13,6–2,5–2,7м
Расход электроэнергии на собственные нужды	100 кВт
КПД котла Брутто	89,54

В настоящее время производится расчет котельного агрегата на теплопроизводительность от 3 до 5 МВт. Теплотворная способность отходов от 5 МДж/кг до 13 МДж/кг. Данная теплотворная способность свойственна отходам с несанкционированных свалок, в которых происходят экзотермические реакции, тем самым снижается теплотворная способность отходов. Еще одной ключевой чертой отходов является высокая влажность, что крайне сильно влияет на процесс горения. Поддержание режима горения в котле обеспечивается подачей жидкого топлива через форсунки. В качестве жидкого топлива используется дизель. Подача питательной воды в котельный агрегат и обратно в сеть осуществляется из тепловой муниципальной сети. Подключение к сети осуществляется через индивидуальный тепловой пункт (ИТП), центральный тепловой пункт (ЦТП), котельную при помощи системы гибкой связи.

В качестве примера системы гибкой связи – гофротруба, через которую осуществляется получение питательной воды (обратная сетевая вода) и передача теплоносителя (прямой сетевой воды) в сеть. В данном случае наличие длинных сетей получения и передачи воды крайне нежелательно, обуславливается это необходимостью установки дополнительного насосного оборудования. Оптимальная протяженность системы гибкой связи не должна превышать 100 м. Движение воды в котельном агрегате совершается по принципу противотока для достижения наивысшего потенциала на выходе из котельного агрегата. В начале сетевая вода подается в конвективный пучок, где нагревается до 98 °С и поступает в фестон. В фестоне вода нагревается до 102 °С и поступает в топку котельного агрегата. В топке котельного агрегата сетевая вода нагревается до 150 °С. Полученный теплоноситель заданных параметров направляется потребителю.

Основное влияние на выработку теплоносителя оказывает местоположение свалки. Нередко несанкционированные свалки расположены в удаленных местах, где генерация горячей воды невозможна ввиду отсутствия возможности подключения к тепловой сети. В этом случае мобильная установка работает исключительно в режиме переработки и подготовки твердых коммунальных отходов к сжиганию. По мере того как несанкционированная свалка будет ликвидирована, мобильная установка меняет свое местоположение для выполнения подключения к тепловой сети и утилизации подготовленных отходов с несанкционированной свалки.

Производство тепловой энергии является одной из главных особенностью мобильной установки. Одновременно с этим в мобильной установке возможно производство и электрической энергии. В этом случае устанавливается паровой котельный агрегат с микротурбиной. Однако на сегодняшний день возможность использования получаемой электрической энергии возможно лишь в самой установке, для покрытия собственных нужд.

Процесс передачи электроэнергии от мобильных установок в электрическую сеть слабо изучен и крайне сложен в нашей стране, поэтому основным видом деятельности выбран вариант с производством тепловой энергии. Обеспечение электрической энергией в мобильной установке реализуется за счет дизель генератора.

При реализации компоновки для производства электрической энергии мобильная установка попадает под «зеленый тариф». Зеленым тарифом называется система покупки государством электроэнергии, полученной на основе возобновляемых источников энергии, а также при сжигании отходов на 40 % выше себестоимости произведенной энергии. Используя зеленый тариф, мобильная установка будет экономически привлекательна в большей степени ввиду большого спроса на переработку отходов.

В Российской Федерации катастрофически не хватает подобных технологических решений, которые способны помочь с решением сложившейся проблемы твердых коммунальных отходов.

# РАСЧЕТЫ ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ С ПРОДУКТАМИ СГОРАНИЯ ТОПЛИВ

## Пример № 1

Определить расчетный выход оксидов азота из котлоагрегата ТПП – 312 А при сжигании донецкого угля марки ГСШ с жидким шлакоудалением и природного газа.

*Исходные данные:*

Теплота сгорания угля  $Q_H^p = 20,47$  Мдж/кг.

Теплота сгорания природного газа  $Q_H^p = 37,3$  Мдж/кг.

Температура горячего воздуха  $t_{гв} = 384/370$  °С.

Доля рециркуляции газов – 0,1.

Коэффициент избытка воздуха на выходе из топочной камеры  $\alpha = 1,1$ .

Температура продуктов сгорания на выходе из топочной камеры  $t_{вых} = 1190/1210$  °С.

Тепловое напряжение сечения топочной камеры  $q_T = 4,86 \frac{\text{МВт}}{\text{м}^2}$ .

Периметр топочной камеры  $\Pi = 51,9$  м.

Присосы воздуха в топочную камеру  $\Delta\alpha = 0,1$ .

Объемы продуктов сгорания твердого топлива  $V_r^0 = 6,28$  м<sup>3</sup>/кг;

$V_r^0 = 5,83$  м<sup>3</sup>/кг.

Объемы продуктов сгорания газообразного топлива  $V_r^0 = 11,16$  м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;

$V_r^0 = 9,9$  м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>.

Энтальпия горячего воздуха для твердого топлива  $h_{гв} = 2879$  Кдж/кг.

Энтальпия горячего воздуха для газообразного топлива  $h = 4992$  Кдж/кг.

Присосы воздуха в систему пылеприготовления  $\Delta\alpha_{п.п} = 0,1$ .

Влажность топлива  $W^p = 8$  %.

*Расчет:*

Определяем оксиды азота при сжигании донецкого ГСШ.

1. Определяем располагаемое количество теплоты в топочной камере:

$$Q'_T = Q_H^p + h_{гв} = 20,47 \cdot 10^3 + 2879 = 23349 \text{ Кдж/кг.}$$

2. Находим расчетную адиабатическую температуру горения:

$$T_a^r = \frac{Q'_T}{V_r^0 \cdot 1,706 + 1,016 \cdot (\alpha - 1) \cdot V_r^0 \cdot 1,535} + 273 = 2010 + 273 = 2283 \text{ К}$$

Максимальная температура в зоне горения, учитывая что топочная камера с жидким шлакоудалением при этом  $\beta_{ст} = 0,965$ . Учитываем также, что

экраны топки в зоне горения на высоту 5,5 футерованы. Условный коэффициент футерованной части экранов определяется как:

$$\varepsilon_{\text{эф}} = 0,53 - 0,25 \cdot \frac{1230}{1000} = 0,22$$

3. Температурный интервал реакции образования оксидов азота:

$$\Delta T_p = \frac{2030^2 \cdot 10^{-5}}{0,614 + 0,0203} = 64,9 \text{ с}$$

4. Расчетное время реакции в топочной камере:

$$\tau_{\text{преб}} = \frac{273 \cdot 0,8}{0,155 \cdot 1810 \cdot 0,278 \cdot 1,15} = 2,3 \text{ с}$$

5. Средняя температура газов в топочной камере:

$$T_r = 0,84 \cdot (2030^4 + 1463^4)^{0,25} = 1810 \text{ К}$$

Тогда:

$$\tau_p = \frac{64,9}{2283 - 1463} \cdot \left( \frac{4,86 - 54,9}{300} \right)^{0,5} \cdot 2,3 = 0,164 \text{ с}$$

6. Теоретическое время достижения равновесия:

$$\tau_0 = 0,024 \exp \cdot \left( \frac{54290}{2030} - 23 \right) = 1,01 \text{ с}$$

7. Концентрация термических оксидов азота:

$$C_{O_2} = \frac{0,21 \cdot 5,83 \cdot 0,1 \cdot 1,428}{6,28 + 0,1 \cdot 5,83} = 0,025 \text{ кг/м}^3$$

8. Количество термических оксидов азота:

$$NO_2^{\text{TP}} = 7030 \cdot 0,025^{0,5} \exp \cdot \left( \frac{-10860}{2030} \right) \cdot \frac{0,164}{1,01} = 0,84 \text{ г/м}^3$$

Определяем топливные и быстрые оксиды азота, содержание азота в топливе  $N^p = 1 \%$

9. Находим количество топливных оксидов азота:

$$NO_2^{\text{ТЛ}} = \left( \frac{0,40 - 0,1 \cdot 1}{1,1^2} \right) \cdot \left( \frac{2100 - 2300}{125} \right)^{0,33} = 0,30 \text{ г/м}^3$$

Суммарный выход оксидов азота при сжигании угля и жидком шлакоудалении:

$$NO_2 = NO_2^{\text{TP}} + NO_2^{\text{ТЛ}} = 0,84 + 0,30 = 1,14 \text{ г/м}^3$$

**Выход оксидов азота при сжигании природного газа находится следующим образом.**

Ожидаемая алиабатная температура горения, без учета рециркуляции газов:

$$\vartheta'_T = 37,3 \cdot 10^3 + 4992 = 42292 \text{ Кдж/м}^3$$

$$\alpha_{\text{гор}} = 1,1 - 0,5 \cdot 0,1 = 1,05$$

$$l_a = \frac{1950}{1,05} \cdot (1 + 0,36 \cdot 0,423) = 2135^\circ\text{C}$$

Теплоемкость газов и воздуха:

$$K_1 = \frac{2135 - 1200}{1000} = 0,935 \text{ Кдж/м}^3$$

$$C_B = 1,46 + 0,092 \cdot 0,935 = 1,546$$

Расчетная адиабатная температура горения:

$$T_a = \frac{42292}{11,16 \cdot 1,695 + 1,016 \cdot (1,05 - 1) \cdot 9,96 \cdot 1,546} + 273 = 2420$$

При сжигании природного газа происходит некоторое выгорание футеровки стен. Принимая тепловую эффективность в зоне футеровки  $\psi_{ст} = 0,3$ , найдем расчетную эффективность зоны горения:

$$\psi_{з.г.} = \frac{0,3 \cdot 285,5 + (0,2 + 0,45) \cdot 149,6}{584,7} = 0,313$$

$$T_M = 0,97 \cdot 2420 \cdot (1 - 0,313)^{0,25} \cdot (1 - 0,1^{1+3,0 \cdot 0,1}) = 2030 \text{ К}$$

$$T_M = 1,01 \cdot 2030 = 2050 \text{ К}$$

Температурный интервал реакции образования оксидов азота:

$$T_p = \frac{2052^2 \cdot 10^{-3}}{0,614 + 0,0205} = 66,3 \text{ К}$$

$$T_r = 0,84 \cdot (2050^4 + 1483^4)^{0,35} = 1814 \text{ К}$$

Расчетное время реакции в топочной камере:

$$\tau_p = \frac{66,3}{2420 - 1483} \cdot \left( \frac{4,86 \cdot 51,9}{300} \right)^{0,5} \cdot 2,15 = 0,138 \text{ с}$$

$$\tau_{\text{преб}} = \frac{273 \cdot 0,8}{0,155 \cdot 1814 \cdot 0,3 \cdot 1,1 \cdot (1 + 0,1)} = 2,15 \text{ с}$$

Теоретическое время достижения равновесия:

$$\tau_0 = 0,024 \exp\left(\frac{54290}{2050 - 23}\right) = 0,78 \text{ с}$$

Концентрация теоретических оксидов азота при :

$$CO_2 = \frac{0,21 \cdot 9,96 \cdot (0,05 + 0,1 \cdot 0,12) \cdot 1,428}{(11,16 + 0,65 \cdot 9,36) \cdot 1,1} = 0,0144 \text{ кг/м}^3$$

$$NO_2^{\text{тп}} = 7030 \cdot 0,0144^{0,5} \exp\left(\frac{-10860}{2050}\right) \cdot \frac{0,138}{0,78} = 0,735 \text{ г/м}^3$$

Быстрые оксиды азота:

$$NO_2^b = 0,1 \cdot \left(\frac{1,05 + 0,1}{1,1}\right)^2 \cdot \left(\frac{2050 - 800}{1000}\right)^{0,33} = 0,118 \text{ г/м}^3$$

Суммарный выход оксидов азота при сжигании природного газа с рециркуляцией составит:

$$NO_2^o = 0,735 + 0,118 = 0,853 \text{ г/м}^3$$

## Пример № 2

Рассчитать золоуловительную установку с циклонами типа ЦН-15.

*Исходные данные:*

Расход дымовых газов  $Q = 20 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Плотность газов  $\rho_{\text{г}} = 0,785 \text{ кг}/\text{м}^3$ .

Концентрация летучей золы  $C_{\text{вх}} = 20 \text{ м}^3/\text{м}^3$ .

Дисперсный состав золы:

Средний (медианный) размер частиц  $d_{\text{м}} = 15 \text{ мкм}$ .

Степень полидисперсности для каменных углей  $\xi_{\text{G2}} = 0,334$ .

Плотность частиц золы  $\rho_{\text{г}} = 2000 \text{ кг}/\text{м}^3$ .

Динамическая вязкость газов при рабочей температуре  $\mu = 20 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}$ .

*Решение:*

Оптическая скорость для нашего циклона [16].

Действительная скорость газа в циклоне:

$$W = \frac{4 \cdot 20}{3,14 \cdot 2 \cdot 2^2} = 3,18 \text{ м/с}$$

Действительная скорость в циклоне не должна отклоняться от оптимальной более чем на 15 %

$$\Delta W = \frac{3,5 - 3,18}{3,5} \cdot 100 = 9\%$$

Высота цилиндрической части циклона [16]:

$$H_{\text{ц}} = 2 \cdot 2,26 = 4,52 \text{ м}$$

Высота конической части:

$$H_{\text{к}} = 2 \cdot 2 = 4 \text{ м}$$

Высота выхлопной трубы:

$$H_{\text{т}} = 2 \cdot 1,74 = 3,48 \text{ м}$$

Внутренний диаметр выхлопной трубы:

$$d_{\text{вн}} = 2 \cdot 0,3 = 0,6 \text{ м}$$

Диаметр бункера:

$$D_{\text{б}} = 2 \cdot 1,5 = 3 \text{ м}$$

Высота цилиндрической части бункера:

$$H_{\text{ч.б}} = 2 \cdot 0,8 = 1,6 \text{ м}$$

Коэффициент гидравлического сопротивления одиночного циклона:

$$\xi = \kappa_1 \cdot \kappa_2 \cdot \xi_{500}$$

Все коэффициенты в последней формуле принимаются из [16]:

$$\xi = 1 \cdot 0,92 \cdot 155 = 142,6$$

Гидравлическое сопротивление циклона:

$$\Delta p = 142,6 - 0,785 \cdot \left( \frac{3,18^2}{2} \right) = 566 \text{ Па}$$

Коэффициент полезного действия циклона равен:

$$\eta_{\text{ц}} = 0,5 \cdot (1 + 0,703) = 0,851$$

### Пример № 3

Расчет конденсации паров серной кислоты в канале РВП – регенеративный воздухоподогреватель. Для удобства расчета представим расчеты в виде таблицы:

Наименование	Расчетная формула	Порядковый номер участка			
		1	2	3	4
Длина участка, м	$X_c$	0,126	0,108	0,108	0,108
Площадь участка, м <sup>2</sup>	$L_i$	0,059	0,05	0,05	0,05
Температура стенки, °С	$t_{cti}$	137	120	105	90,3
Парциальное давление на входе, $\cdot 10^5$ кгс/см <sup>2</sup>	$p'_i$	4	3,18	2,29	1,6
Парциальное давление При температуре стенки $\cdot 10^5$ кгс/см <sup>2</sup>	$p_{cti}$	1,7	0,26	0,024	0,01
Модуль переноса $\cdot 10^5$	$\Delta_i = p_i - p_{cti}$	2,3	2,92	2,266	1,59
Количество кислоты сконденсировавшейся на участке, $\cdot 10^5$ кг/г	$g_i \cdot \beta \cdot f_i \cdot \Delta_i$	52,3	56,1	43,5	30,5
Поток переноса, $\cdot 10^5$ кг/м <sup>2</sup> ·ч	$L_i = \beta_i \cdot \Delta_i$	8,85	1120	874	613
Количество конденсата по всему каналу, $\cdot 10^5$ кг/м <sup>2</sup> ·ч	$G = \sum_{i=1}^n g \cdot i$	182,4			

### Пример № 4

Определить предельно допустимый выброс (ПДВ) летучей золы из дымовой трубы.

*Исходные данные:*

Высота дымовой трубы  $H = 180$  м.

Диаметр устья трубы  $D = 7$  м.

Фоновая концентрация нетоксичной пыли в воздухе составляет  $C_{\phi} = 0,15 \text{ мг/м}^3$ . Разность температур между газовой смесью и атмосферным воздухом составляет  $\Delta T = 150 \text{ }^\circ\text{C}$ . Объемный расход газовой смеси, выбрасываемой из трубы  $V_1 = 900 \text{ м}^3/\text{с}$ . Предприятие расположено в Московской области.

*Решение:*

При условии не превышения максимальной концентрации вредных веществ в приземном слое атмосферы при неблагоприятных метеорологических условиях предельно допустимый выброс вредных веществ равен массе выбрасываемого вещества:

$$\text{ПДВ} = M, \text{ г/с}$$

С учетом концентрации (ПДК- $C_{\phi}$ ):

$$\text{ПДВ} = \frac{H^2 \cdot (\text{ПДК} - C_{\phi})^3 \sqrt[3]{V_1 \cdot \Delta T}}{A \cdot F_{\text{Тп}}},$$

где  $A = 120 \cdot C_{\phi}^2 \cdot \text{мг} \cdot \text{К}^{\frac{1}{3}}/\text{г}$

$$F = 2$$

$$W_0 = \frac{V_1 \cdot 4}{\pi \cdot D^2} = \frac{3600}{3,14 \cdot 49} = 23,4 \text{ м/с}$$

$$f = 10^3 \cdot \frac{W_0^2 \cdot D}{H^2 \cdot \Delta T} = \frac{547,1 \cdot 7}{32400 \cdot 150} = 0,788$$

$$m = \frac{1}{0,67 + 0,1 \sqrt{f + 0,34 \sqrt[3]{f}}} = \frac{1}{0,67 + 0,1 \sqrt{0,788 + 0,34 \sqrt[3]{0,788}}} = \frac{1}{1,073} = 0,932$$

$$\vartheta_M = 0,65 \sqrt[3]{\frac{V_1 \cdot \Delta T}{H}} = 0,65 \sqrt[3]{\frac{900 \cdot 150}{180}} = 5,916$$

$\vartheta_M > 2$ , следовательно  $n = 1$ .

$$\text{ПДВ} = \frac{180^2 \cdot (0,5 - 0,15)^3 \sqrt[3]{900 \cdot 150}}{120 \cdot 2 \cdot 0,932} = 2600 \text{ г/с} = 9,36 \text{ т/ч}$$



## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Белоусов, В. Н., Смородин, С. Н., Цимбал, В. Д. Топливо и процессы горения в теплоэнергетических установках. Часть 2 [Текст]: Учеб. пособие / В. Н. Белоусов, С. Н. Смородин, В. Д. Цимбал – СПб., 2020 – 152 с.
2. Беликов, С. Е., Котлер, В. Р. Котлы тепловых электростанций и защита атмосферы [Текст] / С. Е. Беликов, В. Р. Котлер. – Москва: Аква-Терм, 2008 – 212 с.
3. Бабий, В. И., Котлер, В. Р. Вербовецкий, Э. Х., Механизм образования и способы подавления оксидов азота в пылеугольных котлах [Текст] / В. И. Бабий, В. Р. Котлер // Энергетик. – 1996. – № 6. – с. 8–13.
4. Охрана водного и воздушного бассейнов от выбросов тепловых электростанций [Текст]: Учебник для вузов / Л. А. Рихтер, Э. П. Волков, В. Н. Покровский; под ред. П. С. Непорожного. – М.: Энергоиздат, 1981, – 296 с., ил.
5. Повышение экологической безопасности тепловых электростанций [Текст]: Учеб. пособие / А. И. Абрамов, Д. П. Елизаров, А. Н. Ремезов и др.; под ред. А. С. Седлова. – М.: Издательство МЭИ, 2001. – 378 с., ил.
6. Григорьев, Л. Н., Буренина, Т. И. Промышленная экология. Часть 1 [Текст]: Учебное пособие / Л. Н. Григорьев, Т. И. Буренина; ГОУ ВПО СПбГТУ РП. – СПб., 2004. – 104 с.: ил. 20.
7. Процессы горения топлива и защита окружающей среды [Текст] / Н. В. Лавров, Э. И. Розенфельд, Г. П. Хаустович. – М.: Металлургия, 1981. – 240 с.
8. Котлер, В. Р. Оксиды азота в дымовых газах котлов [Текст] / В. Р. Котлер. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 144 с.
9. Рыжиков, В. А. Совместная утилизация твердых древесных отходов и отходов целлюлозно-бумажного производства [Текст] / В. А. Рыжиков, А. Г. Кузнецов, Д. Ю. Уварова, А. А. Пекарец, Э. Л. Аким // Сборник материалов XXV Международного Биос-форума и Молодежной Биосолимпиады 2020. Книга 2 / сост.: А. И. Шишкин, В. С. Куров, И. В. Антонов, А. И. Кушнеров, Ю. Н. Бубличенко, Н. Ю. Быстрова. – СПб.: СПбНЦ РАН: «Любавич». – 2020. – С. 373–377.
10. Рыжиков, В. А. Переработка отходов картонно-бумажной макулатуры, содержащей целлюлозу и синтетические полимеры [Текст] / В. А. Рыжиков, А. А. Пекарец, А. Г. Кузнецов, Э. Л. Аким // Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. – СПб. – 2021 г. – № 5 – 347–351 с.
11. Пат. 202729 Российская Федерация, F23G 5/00. Мобильная установка для утилизации твердых коммунальных отходов [Текст] / Зеленский С. И., Сколяров Я. Н., Дудинский А. И.; заявитель и патентообладатель С. И. Зеленский, Я. Н. Сколяров, А. И. Дудинский. – Заявл. 01.12.20; опубл. 03.03.21, Бюл. № 7. – 2 с.

12. Зеленский, С. И. Ликвидация твердых коммунальных отходов на Крайнем Севере с использованием мобильной установки [Текст] / С. И. Зеленский, Я. Н. Сколяров, А. И. Дудинский // Энергетик. – 2021. – № 4. – С. 18–20.
13. Зеленский, С. И. Утилизация твердых коммунальных отходов с несанкционированных свалок [Текст] / С. И. Зеленский, Я. Н. Сколяров, А. И. Дудинский // Экология и промышленность России. – 2021. – Т. 25. – № 6. – С. 4–9.
14. Зеленский, С. И. Мобильная энергетическая установка для утилизации твердых коммунальных отходов [Текст] / С. И. Зеленский, Я. Н. Сколяров, А. И. Дудинский // Вторая научно-техническая конференция с международным участием «Экология в энергетике». Сборник докладов. – Москва, 2021. – С. 76–85.
15. Безгрешнов, А. Н. Расчет паровых котлов в примерах и задачах [Текст] / А. Н. Безгрешнов. – М., Энергоатомиздат, 1991. – 241 с.
16. Баженов, М. И. Сборник задач по курсу «Промышленные тепловые электростанции» [Текст]: Учеб. пособие / М. И. Баженов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 128 с.
17. Внуков А. К. Теплохимические процессы в газовом тракте паровых котлов [Текст] / А. К. Внуков. – М.: Энергоиздат, 1981. – 296 с.

Учебное издание

**Зеленский Сергей Иванович  
Рыжиков Владимир Александрович  
Сколяров Ян Николаевич**

## **Охрана окружающей среды при работе теплоэнергетических систем**

*Учебное пособие*

Редактор и корректор А. А. Чернышева

Техн. редактор Д. А. Романова

Темплан 2022 г., поз. 5125/22

---

Подписано к печати 27.12.2022.

Формат 60x84/16.

Бумага тип № 1.

Печать офсетная.

Печ.л. 6,1.

Уч.-изд. л. 6,1.

Тираж 30 экз. (1 завод).

Изд. № 5125/22.

Цена «С». Заказ №

---

Ризограф Высшей школы технологии и энергетики СПбГУПТД, 198095,

Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, 4.