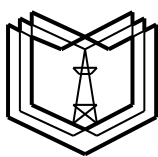


**Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации**



**Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Казанский государственный энергетический университет»**

Л.Р. ГАЙНУЛЛИНА, Р.Р. ТАКТАМЫШЕВА

**ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ
В ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ
КОМПЛЕКСЕ**

Учебное пособие

**Казань
2020**

УДК 502/504:658.26

ББК 20.1

Г14

Рецензенты:

канд. техн. наук, доц. каф. «Энергообеспечение предприятий
и энергоресурсосберегающих технологий» ФГБОУ ВО КГЭУ А.В. Ахмеров

директор ООО «НИПИ «ТЕХНОПОЛИС» Н.В. Усманов

Г14 Гайнуллина Л.Р., Тактамышева Р.Р.

Экологические проблемы в топливно-энергетическом комплексе:
учеб. пособие / Л. Р. Гайнуллина, Р. Р. Тактамышева. – Казань:
Казан.гос. энерг. ун-т, 2020. – 99 с.

Рассмотрены экологические аспекты влияния топливно-энергетического комплекса на окружающую среду, в частности атмосферу и гидросферу. Даны характеристики дымовых выбросов и сточных вод. Приведены методы снижения выбросов золы, оксидов серы и азота. Описаны методы очистки сточных вод, в том числе с возможностью повторного использования очищенной воды и утилизации выделенных веществ.

Предназначено для студентов всех форм обучения по образовательным программам направления 13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника, направленность (профиль) «Энергообеспечение предприятий».

УДК 502/504:658.26

ББК 20.1

© Гайнуллина Л.Р., Тактамышева Р.Р., 2020

© Казанский государственный энергетический университет, 2020

ВВЕДЕНИЕ

Экологические проблемы мировой энергетики в основном сводятся к следующим аспектам: негативные последствия для окружающей среды в связи с выбросами в атмосферу вредных веществ, сбросов сточных вод, источниками которых являются производство и потребление нефти, газа и угля; опасность радиационных выбросов в связи с эксплуатацией атомных электрических станций (АЭС); нерациональное развитие гидроэнергетики.

Мировое сообщество уже многие годы волнует глобальное изменение климата, основной причиной которого, по мнению специалистов, является действие парникового эффекта, связанного с увеличением вредных выбросов в атмосферу, в первую очередь двуокиси углерода (CO_2), а также других веществ. На долю ТЭК приходится около 90 % выбросов парниковых газов, около половины всех вредных выбросов в атмосферу и треть вредных веществ, сбрасываемых в воду.

11 декабря 1997 г. на международном саммите под эгидой ООН в японском городе Киото был принят и подписан 159 странами Протокол к Конвенции ООН по глобальным изменениям климата. Киотский протокол – это международный договор, предусматривающий договоренности о сокращении выбросов вредных промышленных газов.

Что касается перспектив ядерной энергетики, то, с одной стороны, АЭС является практически единственным источником энергии в промышленных масштабах не связанным с выбросами не только CO_2 , но и других парниковых газов, и поэтому полностью соответствующим требованиям протокола Киото, но, с другой стороны, общественные движения многих стран ОЭСР выступают категорически против АЭС.

В Энергетической стратегии много внимания уделяется экологической политике в отношении ТЭК с учетом международных стандартов в этой сфере, в первую очередь заложенных в Киотском протоколе. Одним из принципов Энергетической стратегии является экологическая безопасность, а именно, развитие энергетики, не сопровождаемое увеличением ее негативного воздействия на окружающую среду. Предусмотрен комплекс мер в этой области, которые позволят снизить уровень выбросов в окружающую среду вредных веществ и парниковых газов, последовательно ограничивая нагрузку ТЭК на окружающую среду и приближая параметры его деятельности к соответствующим европейским экологическим нормам [1].

Цель издания учебного пособия по дисциплине «Экологические проблемы в топливно-энергетическом комплексе» является формирование базы знаний в области топливно-энергетического комплекса и его влияния на окружающую среду, а также формирования эколого-экономического мышления в направлении снижения его негативного влияния.

В процессе изучения дисциплины «Экологические проблемы в топливно-энергетическом комплексе» у студентов формируются следующие компетенции:

- способность осуществлять поиск, хранение, обработку и анализ информации из различных источников и баз данных, представлять ее в требуемом формате с использованием информационных, компьютерных и сетевых технологий;

- способность демонстрировать базовые знания в области естественно-научных дисциплин, готовностью выявлять естественнонаучную сущность проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности; применять для их разрешения основные законы естествознания, методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования.

В результате изучения дисциплины «Экологические проблемы в топливно-энергетическом комплексе» студент должен:

- знать экологические аспекты воздействия ТЭК на окружающую среду, способы защиты атмосферы и гидросферы от влияния ТЭК;

- уметь выбирать метод по очистке дымовых газов и сточных вод, а также составлять комплекс мероприятий по снижению воздействия объекта ТЭК на окружающую среду;

- владеть методиками расчета аппаратов и схем по очистке дымовых газов и сточных вод.

Глава 1. ВОЗДЕЙСТВИЕ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

Топливо-энергетический комплекс (ТЭК) – это совокупность отраслей, связанных с производством, преобразованием, транспортировкой, распределением и потреблением энергии в различных её видах и формах [1]. В состав ТЭК входят отрасли по добыче и переработке различных видов топлива (топливная промышленность), электроэнергетика и предприятия по транспортировке и распределению электроэнергии. Помимо выполнения функции снабжения топливом и энергией всех отраслей хозяйства ТЭК России является главным поставщиком валюты. Топливо-энергетические ресурсы составляют 40% всего экспорта России. В мире Россия прочно занимает второе место по экспорту нефти после лидирующей Саудовской Аравии.

Сейчас на долю ТЭК приходится около 45 % выбросов вредных веществ в атмосферу, более 30 % сточной воды и столько же твердых отходов от всех загрязнителей.

Экологическая проблема ТЭК – одна из наиболее острых и опасных, поскольку оказывает влияние на окружающую среду, здоровье и жизнь человека.

1.1. Экологические аспекты воздействия топливно-энергетического комплекса на атмосферу

Антропогенное загрязнение атмосферы доминирует над естественным (лесные пожары, извержения вулканов и т.п.). Из них 32 % всех загрязнений вносит промышленность, 37 % – автотранспорт и 31 % другие источники [2, 3]. К самым значительным последствиям относят парниковый эффект, разрушение озонового слоя, кислотные дожди, фотохимический смог.

ТЭК негативно влияет на природную среду на всех этапах производственной деятельности: добычи, использования и переработки. Основными видами воздействия являются выбросы загрязняющих веществ в атмосферу, сбросы сточных вод в водные объекты и отходы.

Экологические проблемы начинаются уже на этапе добычи топлива.

Так, в расчете на 1 т угольного топлива на этапе изъятия образуется 20 м^3 метано-воздушной смеси, 0,25 т шахтной породы, 7 т породы вскрыши на разрезах и $2,79 \text{ м}^3$ сточных вод. При переработке углей получается 0,23 хвоста обогащения, а при сжигании – 0,25 т золы [4].

При добыче угля меняются природные ландшафты, нарушается почвенный покров, под землей оседают слои грунта, возникает опасность обвалов и оползней. Образующиеся пустоты необходимо заполнять другими горными породами.

В процессе добычи угля может произойти выброс в атмосферу метана, зольных частиц и токсичных соединений; вблизи месторождений водные ресурсы также загрязняются токсичными микроэлементами, что губительно действует на флору и фауну, делает воду непригодной для питья, купания и бытового использования.

Негативное влияние угледобычи на человека заключается в следующем:

- сокращение продолжительности жизни людей, проживающих в районах ведения угледобычи;
- повышение случаев аномалий и патологий;
- увеличение неврологических и онкологических заболеваний.

Поскольку уголь является неэкологичным источником энергии, доля его в ТЭК России снижется. В этой связи для снижения негативного влияния добычи и использования угля на экологию и человека необходимо переходить на более экологичные методы производства этой отрасли промышленности и применять безопасные технологии.

Дымовые газы, образующиеся при сжигании мазута, содержат оксиды азота, соединения ванадия и натрия, газообразные и твердые продукты неполного сгорания. Перевод установок на жидкое топливо существенно уменьшает золообразование, но практически не уменьшает выбросы SO₂, так как содержание серы в мазутах, используемых в качестве топлива, достигает 3–4,5 % и более. При сжигании природного газа (неочищенного) в дымовых газах образуются диоксид серы и оксиды азота. Следует отметить, что наибольшее количество оксидов азота образуется при сжигании жидкого топлива.

Одной из основных экологических проблем в нашей стране является низкий уровень утилизации попутного нефтяного газа (ПНГ). До сих пор сжигание огромного количества ПНГ – основной источник экологического загрязнения в районах нефтяных промыслов[5].

Примерно треть всей добываемой мировой нефти характеризуется высоким содержанием серы (более 1 % от общего объема сырья, в некоторых месторождениях – до 14 %). Таким образом, при сжигании такой нефти в окружающую среду выбрасываются такие вредные вещества, как сероводород, диоксид серы и меркаптаны.

При горении факелов в структуре атмосферных выбросов присутствуют следующие вещества: метан, этан, пропан, бутан, пентан, гексан, гептан, диоксид серы, сероводород, меркаптаны, оксид азота, диоксид углерода. Если в добываемом сырье высокая концентрация углеводородов ароматической группы, то горение факелов выбрасывает в атмосферу большие количества таких химических веществ, как бензол, толуол, фенол и ксилолы.

1.2. Характеристика пылегазовых выбросов в атмосферу

Работа ТЭК сопровождается выделением в атмосферный воздух различных веществ, загрязняющих воздушную среду.

Пыль и другие аэрозоли. В технике и в повседневной жизни постоянно приходится сталкиваться с веществами, находящимися в измельченном состоянии. Аэрозоль представляет собой полидисперсную, содержащую частицы различных размеров, от 1 см до 100–500 мкм, систему, в которой дисперсной средой является газ, в частности, воздух, а дисперсной фазой – твердые или жидкие частицы. Верхний предел ограничен тем, что крупные частицы весьма быстро осаждаются под действием сил тяжести и во взвешенном состоянии практически не наблюдаются, а нижний предел определяется относительно недолгой возможностью длительного самостоятельного существования весьма малых частиц. Аэрозоли с твердыми частицами различают по твердости, растворимости и формам частиц, воспламеняемости, взрывоопасности и электроразряженности [6].

Пылью называют грубодисперсные (с твердыми частицами) аэрозоли, которые образуются при механическом измельчении и распылении различных веществ.

Туман – это газообразная среда с жидкими частицами, образуемыми при конденсации насыщенных паров либо в результате газовых реакций, а также при измельчении жидких веществ.

Дымом или свободнодисперсным аэрозолем называют конденсационные, образуемые при конденсации насыщенных паров, а также в результате газовых реакций, аэрозоли с твердой, не выпадающей в осадок дисперсной фазой.

Часто бывает затруднительно провести четкую границу между различными видами аэрозолей (пыль, туман, дым) в связи с тем, что аэрозольные системы состоят из частиц различного происхождения, которые находятся в постоянном взаимодействии (происходит осаждение малых частиц на более крупные, возникновение конгломератов, их укрупнение, разрушение и т. п.), что влечет за собой изменения отдельных свойств вещества и возникновение новых. Это вызвано тем, что при диспергировании вещества многократно увеличивается его суммарная поверхность (при измельчении тела, имеющего форму куба и размеры $20 \times 10 \times 10$ мм, и превращении его в частицы кубической формы с размером 1 мкм суммарная поверхность материала возрастет в 10 000 раз и станет равной 6 м^2 (вместо 600 мм^2), вследствие чего повышается поверхностная энергия измельченного вещества, увеличивается его физическая и химическая активность (ускоряются процессы окисления,

появляются горючесть и взрываемость пыли во взвешенном состоянии, помимо этого измельченное вещество быстрее растворяется, чем исходный материал и т. д.).

Большинство систем очистки предназначено для улавливания пыли, так как в большинстве случаев воздух приходится очищать от данного вида аэрозоля.

Пыль характеризуется большим разнообразием по химическому составу, размеру частиц, их форме, плотности, характеру краев частиц и т. д., поэтому пыль может быть классифицирована по следующим основаниям:

- 1) в зависимости от происхождения – естественная и промышленная;
- 2) по химическому составу вещества (в зависимости от материала, из которого пыль образована) различают органическую (растительного и животного происхождения) и неорганическую (минеральную и металлическую).
- 3) по способу образования – дисперсионная и конденсационная;
- 4) в зависимости от дисперсности – моно- и полидисперсная;
- 5) по диаметру частиц – наиболее крупнодисперсная, крупнодисперсная, среднедисперсная, мелкодисперсная и наиболее мелкодисперсная пыль;
- 6) по характеру взаимодействия с организмом человека – токсичную и нетоксичную.

Пыли разнообразно воздействуют на организм человека и окружающую среду. В частности, пыль может причинить вред организму в результате механического воздействия (повреждение органов дыхания острыми краями пыли), химического (отравление ядовитой пылью), бактериологического (вместе с пылью в организм проникают болезнетворные микроорганизмы). Пыль оказывает вредное действие на органы дыхания, зрение (конъюнктивиты), кожу (дерматиты), а при проникновении в организм человека – также на пищеварительный тракт.

Пыли способны образовывать с воздухом взрывоопасные смеси.

При сжигании угля на тепловых электрических станциях (ТЭС) за счет выгорания углерода и удаления летучих соединений происходит концентрирование микроэлементов в золе и шлаке. Степень концентрирования зависит от зольности углей, форм нахождения в них микроэлементов и летучести их оксидов и других соединений, образующихся в процессе горения и перемещения газов по дымовому тракту ТЭС. Зола, выбрасываемая ТЭС вызывает снижение продуктивности сельскохозяйственных полей, ухудшает санитарное состояние территории, что негативно влияет на здоровье человека.

Оксид углерода (угарный газ CO) – бесцветный, высокотоксичный газ без запаха, относительная плотность по воздуху которого составляет $0,967 \text{ кг/м}^3$. Угарный газ образуется в результате неполного сгорания углерода при недостатке поступления кислорода. Через легкие CO проникает в кровь и, вступая в соединение с гемоглобином, образует карбоксигемоглобин. При этом нарушается снабжение организма кислородом. В тяжелых случаях может наступить удушье.

Сероводород (H₂S) – бесцветный высокотоксичный газ с запахом тухлых яиц (порог ощущения запаха $0,012\text{--}0,03 \text{ мг/м}^3$), горит синим пламенем с образованием воды и диоксида серы. Концентрация H₂S в воздухе около 11 мг/м^3 тяжело переносима даже для привычных к нему. Сероводород поражает центральную нервную систему, нарушает кровоснабжение организма. При низких концентрациях обладает раздражающим действием в отношении слизистой оболочки глаз и верхних дыхательных путей.

Диоксид серы (сернистый газ SO₂) – весьма распространенный вредный бесцветный газ с острым запахом, с относительной плотностью по воздуху $2,213 \text{ кг/м}^3$. Поступая в организм через дыхательные пути, оказывает сильное раздражающее действие на слизистые оболочки глаз и верхних дыхательных путей.

Окислы азота – вредные вещества, являющиеся смесью соединений азота при их различном соотношении. Поступают в организм через дыхательные пути. При небольших концентрациях и малом содержании в смеси диоксида азота происходит раздражение слизистых оболочек верхних дыхательных путей.

Углеводороды ароматического ряда (бензол, толуол, ксилол) широко применяются в современном производстве. Их получают при перегонке каменного угля на коксохимических заводах и перегонке нефти. В обычных условиях они находятся в жидком состоянии. Температура кипения бензола (C₆H₆) равна $80,1 \text{ }^\circ\text{C}$, толуола (C₆H₅CH₃) – $110,8 \text{ }^\circ\text{C}$, ксилола ((CH₃)₂C₆H₄) – $144 \text{ }^\circ\text{C}$. Они поступают в организм через дыхательные пути и кожу. Наиболее опасным является бензол. Ароматические углеводороды оказывают негативное воздействие на кроветворные органы и на центральную нервную систему.

Канцерогенные вещества – ряд веществ, применяемых в промышленности, способные вызвать возникновение злокачественных опухолей. Такими веществами являются хром, мышьяк, никель, асбест, бериллий, сажа, смола, минеральные масла и др. Злокачественные новообразования могут возникать даже через значительный период (несколько лет) после прекращения работы с данными веществами.

Свинец (Pb) и его соединения(сернистый свинец, оксид свинца (глет), свинцовый сурик, серноокислый свинец и др.) – тяжелый металл, который при температуре 400–500 °С начинает интенсивно выделять пары.

Свинец поступает в организм большей частью через дыхательные пути, вызывая нарушения в работе органов кровообращения, центральной нервной системы и системы пищеварения. Может накапливаться в различных внутренних органах.

Ртуть (Hg) – жидкий металл, пары которого поступают в организм через органы дыхания, поражая нервную систему, желудочно-кишечный тракт и почки. Ртуть способна накапливаться в организме.

Марганец (Mn) и его соединения (оксид марганца, диоксид марганца, хлористый марганец) поступают в организм через желудочно-кишечный тракт в виде пыли и воздействуют на центральную нервную систему.

Также вредным веществом является **оксид цинка (ZnO)** – белый рыхлый порошок, который в виде пыли поступает в организм через дыхательные пути, вызывает симптомы лихорадки.

Хром (Cr) и его соединения (оксид хрома, диоксид хрома, хромовые квасцы калийные, натриевые и др.) в виде пыли, паров, тумана поступают в организм через дыхательные пути, желудочно-кишечный тракт, всасываются через кожу в виде растворов; могут откладываться в печени, почках, эндокринной системе, легких, волосах и др. Хром и его соединения поражают слизистую оболочку органов дыхания, желудочно-кишечный тракт, вызывают язвы на кожных покровах. Как аллергены, они вызывают заболевание типа бронхиальной астмы.

Никель (Ni) и его соединения в организм поступают через дыхательные пути в виде пыли и вызывают поражение органов дыхания, кожного покрова.

Радиоактивные вещества – вид загрязнения воздушной среды, связанный с развитием атомной энергетики и промышленности по добыче и переработке носителей атомной энергии. Поступающие в окружающую среду радионуклиды отличаются большим разнообразием в отношении интенсивности воздействия на организм человека и животных, на окружающую среду, а также времени своего существования – от долей секунды до тысячелетий [6].

1.3. Экологические аспекты воздействия топливно-энергетического комплекса на гидросферу

Общее количество природной воды на Земле составляет 1 386 млн км³, из них количество пресной воды – 35 млн км³, т. е. около 2,5 %. Объем потребления пресной воды в мире достигает 3 900 млрд м³/год. Около половины этого количества потребляется безвозвратно, а оставшаяся половина превращается в сточные воды [7].

Любой водоем находится во взаимосвязи с окружающей его средой. Следовательно, на него оказывают влияние природные явления, индустрия, промышленное и коммунальное строительство, транспорт, хозяйственная и бытовая деятельность человека. Последствием этих влияний является привнесение в водную среду новых, не свойственных ей веществ – загрязнителей, ухудшающих качество воды.

Для минимизации влияния загрязняющих веществ сбросных вод на качество поверхностных природных вод для каждого выпуска сточных вод установлены нормативы предельно допустимых сбросов (ПДС) вредных веществ. ПДС устанавливаются исходя из условий не превышения предельно допустимых концентраций (ПДК) вредных веществ в контрольном створе водоема.

Основные источники загрязнения ТЭК – нефтедобывающая и нефтеперерабатывающая промышленности, ТЭС. Эксплуатация последних сопряжена с использованием природной воды и образованием сточных вод. Сточной водой является любой поток воды, выводимый из цикла электростанции:

- 1) сбросные воды систем охлаждения;
- 2) шламовые, регенерационные и промывочные воды ВПУ и конденсаторчисток;
- 3) сточные воды систем гидрозолоудаления;
- 4) воды, загрязненные нефтепродуктами;
- 5) отработанные растворы после химической очистки стационарного оборудования и его консервации;
- 6) воды от обмывки конвективных поверхностей котлов, сжигающих мазут;
- 7) воды от гидравлической уборки помещений;
- 8) дождевые и талые воды с территории энергообъекта;
- 9) сточные воды систем водопонижения.

Составы и количества перечисленных стоков зависят от типа и мощности основного оборудования ТЭС, вида используемого топлива, качества исходной воды, способов водоподготовки, совершенства приемов эксплуатации и др. Попадая в водотоки и водоемы, примеси сточных вод могут менять солевой состав, концентрацию кислорода, значение рН, температуру, содержание грубодисперсных примесей (ГДП) и другие показатели воды, затрудняющие процессы самоочищения водоемов и влияющие на жизнеспособность водной фауны и флоры.

В сбросных водах прямоточных и оборотных систем охлаждения с прудом-охладителем контролируются загрязняющие вещества по всем позициям показателей состава сточных вод, перечень которых согласовывается с территориальными органами Минприроды России. Природные воды открытых водоемов, широко используемые в технологических процессах на ТЭС, должны быть достаточно чистыми и не должны способствовать обрастаниям поверхностей биологическими отложениями, так как температурные поля, характерные для процессов охлаждения, способствуют интенсификации этого явления. В то же время вода, возвращающаяся после прохождения технологического цикла, содержит различные примеси, влияющие на микрофлору, биологическую потребность в кислороде и токсичность воды. Обязательный перечень нормируемых и контролируемых показателей состава сточных вод ТЭС приведен в табл. 1.1 [8].

Таблица 1.1

Примерный перечень контролируемых показателей качества сточных вод ТЭС

Показатель	Система-источник сброса		
	система оборотного охлаждения с градирнями	водоподготовительная установка	гидрозоло-удаление
Взвешенные вещества	+	+	+
Водородный показатель рН	+	+	+
Биологическое потребление кислорода	–	–	+
Солесодержание	+	+	+
Хлориды	+	+	+
Сульфаты	+	+	+
Нефтепродукты	+	+	+
Кальций	–	–	+
Железо	–	+	+
Алюминий	–	+	+
Медь	+	–	–

Основное количество воды на ТЭС (около 85–95 %) используется для конденсации отработанного пара в конденсаторах турбин. Оставшиеся 5–15 % объема воды расходуются следующим образом: от 3 до 8 % идет на охлаждение масла и воздуха; от 0,2 до 0,8 % – на восполнение потерь

пара в основном паротурбинном цикле и подпитку теплосети; от 2 до 5 % – на удаление золы и шлака, а также на вспомогательные процессы, связанные с промывкой оборудования, регенерацией и т. д.

Сточные воды систем прямоточного охлаждения ТЭС представляют опасность теплового загрязнения поверхности водоемов и многообразные нарушения их биологического равновесия. От электростанций непрерывно поступает поток воды с температурой на 8–12 °С превышающей температуру воды в водоеме. Крупные ТЭС сбрасывают до 90 м³/с нагретой воды [9].

В тоже время именно они являются основными источниками примесного загрязнения. Например, при промывке поверхностей нагрева котлов и агрегатов серийных блоков ТЭС мощностью 300 МВт образуется до 10 000 м³ разбавленных растворов соляной кислоты, едкого натра, аммиака и солей аммония. Кроме того, сточные воды ТЭС содержат ванадий, никель, фтор, фенолы и нефтепродукты. На крупных электростанциях расход воды, загрязненной нефтепродуктами (масла и мазут), доходит до 10–15 м³/ч при среднем содержании нефтепродуктов после очистки 1–30 мг/кг. При сбросе их в водоемы они оказывают пагубное влияние на качество воды и водные организмы [9].

Основным источником загрязнения нефтепродуктами является нефтеперерабатывающая промышленность. Нефтепродукты образуют на воде тонкую пленку толщиной до долей миллиметра, которая препятствует проникновению солнечного света и обогащению кислородом. Нефтепродукты негативно воздействуют на икру, мальков, взрослых особей рыб, которые при большом загрязнении имеют неприятный запах и непригодны к использованию. Нефть и нефтепродукты являются наиболее распространенными загрязняющими веществами в Мировом океане.

При нефтедобыче в окружающую среду могут попадать сырая нефть, нефтяные и буровые шламы, а также сточные воды, содержащие большое количество вредных химических соединений [10]. Это возможно в следующих ситуациях:

- бурение эксплуатационных скважин;
- аварийное фонтанирование нефтяных и газовых скважин;
- транспортная авария;
- прорыв нефтепровода;
- нарушение герметичности эксплуатационных трубных колонн;
- поломка применяемого оборудования;
- сброс в водоемы промысловых сточных вод, не прошедших соответствующую очистку.

Большая часть промышленных сточных вод и добываемого нефтяного сырья скапливается и затем попадает в поверхностные водоемы по следующим причинам:

- неплотные сальниковые соединения;
- проведение ремонтных работ и бурение скважин;
- переполнение мерных емкостей;
- в процессе очистки мерников;
- разливы нефти во время спуска из резервуаров сточных вод;
- переливы нефти через верхние части резервуаров и т. д.

Самые типичные утечки из резервуаров вызываются коррозией их днищ, поэтому необходим постоянный автоматизированный контроль за уровнем содержимого в промышленных емкостях. Многие временные нефтехранилища полностью не исключают возникновение процессов испарения хранящихся в них продуктов. Главными источниками загрязнений являются промышленные и буровые стоки. Их объем во всех странах мира с развитой нефтедобычей растет быстрыми темпами и намного больше объема добываемого сырья. Зачастую, отсутствие канализационной системы приводит к сбросу промышленных сточных вод непосредственно в ближайшие болота или водоемы, что приводит к серьезным их загрязнениям, которые достигают и подземных грунтовых вод. Разливы нефти также нередко вызываются авариями на установках по сбору нефти и газа, ликвидация которых не всегда происходит быстро и с должным качеством.

Нефтезагрязнения сточных вод влияют не только на поверхностные воды водоемов. С поверхности земли при непосредственной инфильтрации сточных вод нефтепродукты могут поступать и в водоносный слой подземных вод, ухудшая их состав и физические свойства. В связи с этим в подземных водах обнаруживаются ароматические углеводороды, нефтепродукты, фенолы и другие токсиканты [11].

Наиболее опасные последствия для экологической системы вызывают загрязнения почвенного покрова, а также наземных и подземных пресных вод.

Некоторые страны с выходом к морю проводят захоронение бурового шлама, отходов промышленности, строительного мусора, твердых отходов, взрывчатых и химических веществ, радиоактивных отходов, объем которых составляет около 10 % всей массы загрязняющих веществ, поступающих в Мировой океан.

Контрольные вопросы

1. Перечислите основные пылегазовые источники загрязнения атмосферы.
2. Дайте определение понятия «аэрозоль».
3. Какие виды аэрозолей Вы знаете? Охарактеризуйте каждый из них.
4. Перечислите основания для классификации пыли.
5. Какие загрязнители чистого воздуха являются канцерогенными?
6. Дайте определение понятия «предельно-допустимый выброс в атмосферу».
7. Что такое качество атмосферного воздуха?
8. Чем отличаются среднесуточная и максимально-разовая ПДК?
9. Перечислите и охарактеризуйте основные процессы инженерной защиты окружающей среды от техногенных загрязнений.

Глава 2. ЗАЩИТА АТМОСФЕРЫ ОТ ВЛИЯНИЯ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

2.1. Снижение выбросов золовых частиц

Летучая зола является несгораемым остатком топлива, образующегося из его минеральных примесей при горении. При сжигании мазута и газа проблема золоулавливания отсутствует. Зола образуется при сжигании каменного и бурого углей и горючих сланцов. Зола содержится в дымовом газе во взвешенном состоянии.

ПДК летучей золы в атмосферном воздухе приведены в табл. 2.1 [8].

Таблица 2.1

ПДК летучей золы

Вид	Максимально-разовая ПДК	Средне-суточная ПДК
Летучая зола при СаО более 35 %	0,05	0,02
Летучая зола: пыль нетоксичная	0,5	0,15

Содержание золы в дымовых газах зависит от топлива. Так, например, зольность угля Канско-Ачинского бассейна составляет 6,8 %, а горючих сланцов Кашпирского месторождения – 59,2 %. Кроме того, существенное влияние на выброс золовых частиц оказывает тип топочного устройства. Наибольшее количество угольной золы выбрасывается из пылеугольных камерных топок с твердым гранулированным шлакоудалением. К тому же, в топках с твердым шлакоудалением возможен недожог топлива, что снижает расчетную теплоту сгорания топлива. Значительно меньшее количество летучей золы выбрасывается из топки с жидким шлакоудалением. В этом случае часть золы расплавляется в топке и оседает в шлаковую ванну. Жидкое шлакоудаление обеспечивает выпадение золы в топку до 30–40 % (в топках с твердым шлакоудалением – всего лишь 10–20 %), благодаря чему уменьшается процент содержания золы в газах, поступающих на конвективную поверхность котла. В свою очередь, это предотвращает преждевременное истирание труб фракциями летучей золы, способствуя увеличению срока эксплуатации котельного оборудования в целом.

Доля выноса твердых частиц из пылеугольных топок в зависимости от их типа может быть оценена коэффициентом уноса $\alpha_{ун}$ твердых частиц с дымовыми газами (табл. 2.2).

Размеры частиц золы колеблются в пределах от 1 мм до 1 мкм. В зависимости от мощности ТЭС, зольности топлива, физико-химических свойств золы, санитарно-гигиенических условий в районе расположения

электростанций выбирается тип золоуловителей [8]. Для золоулавливания имеют значение размеры и удельный вес (плотность) частиц, а также физические, химические и электрические свойства золы.

Таблица 2.2

Коэффициенты уноса твердых частиц для топочных устройств различного типа

Топка	$\alpha_{ун}$
Камерная с твердым шлакоудалением	0,95
Открытая с жидким шлакоудалением	0,7–0,85
Полуоткрытая с жидким шлакоудалением	0,6–0,8
Двухкамерная	0,5–0,6
С вертикальными предтопками	0,2–0,4
С горизонтальными циклонными предтопками	0,1–0,15

На выбор типа золоуловителей может повлиять и возможность использование золы.

Схематично основные типы золоуловителей изображены на рис. 2.1.

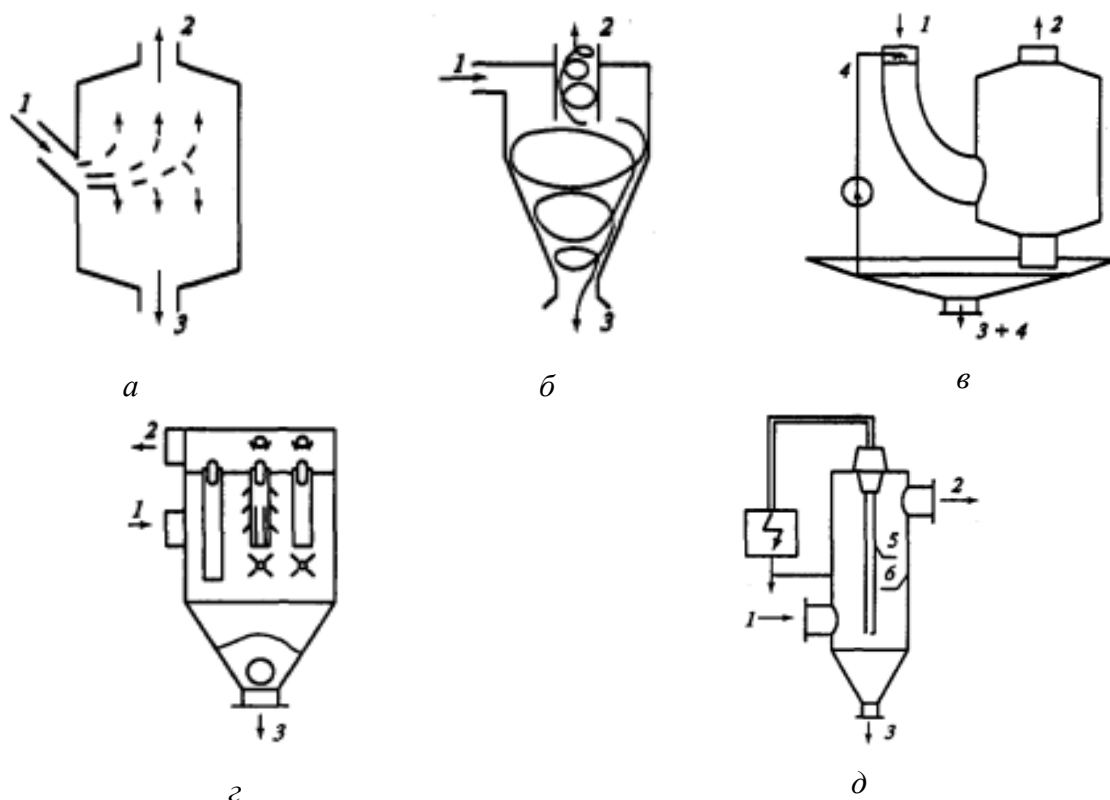


Рис. 2.1. Золоуловители ТЭС: а – осадительная камера; б – циклон; в – мокрый золоуловитель; г – матерчатый фильтр; д – электрофильтр; 1 – дымовые газы; 2 – очищенный газ; 3 – твердые частицы; 4 – вода; 5 – коронирующие электроды; б – осадительные электроды

На ТЭС применяются три типа золоуловителей: аппараты сухой инерционной (жалюзийные золоуловители, циклоны, прямоточные циклоны, батарейные циклоны) и мокрой очистки газов, электрофильтры.

2.1.1. Циклонные (инерционные) золоуловители

Принцип действия циклонных золоуловителей (циклонов) проиллюстрирован на рис. 2.2 [8].

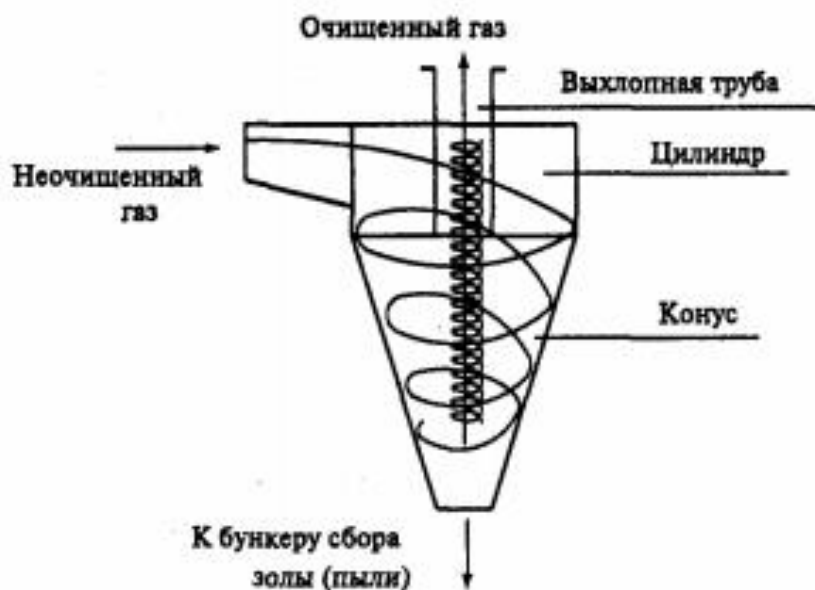


Рис. 2.2. Основные элементы и принцип циклонного золоуловителя

Очищаемый от пыли (летучей золы) газ тангенциально входит в цилиндрическую оболочку (корпус), переходящую внизу в конус. Благодаря вращательному движению потока центробежные силы отбрасывают частицы пыли к периферии и, ударяясь о стенку, последние теряют скорость и вдоль стенки падают в нижнюю часть конуса, а затем удаляются из потока газов через воронку. Выход газов вниз заполнен золой, поэтому поток газов, вращаясь, поворачивает вверх в центральный патрубок и удаляется из корпуса золоуловителя, освобождаясь от большей части летучей золы.

С уменьшением диаметра циклона скорость потока возрастает и степень очистки газов от летучей золы повышается. В связи с этим в энергетике нашли применение небольшие по диаметру циклоны, объединяемые в параллельные группы для обеспечения требуемого расхода газов через них. Они получили название батарейных, или мультициклонов.

На рис. 2.3 даны два варианта расположения циклонных элементов вбатарее – вертикальное и наклонное. В настоящее время применяют циклонные элементы с тангенциальным подводом газов при внутреннем

диаметре 230 мм. Батарейные циклоны обеспечивают улавливание до 94 % летучей золы, их используют на котлах производительностью до 170 т/ч. На более мощных котлах их применяют лишь в качестве первой ступени золоулавливания в комбинации с электрофильтрами при высокой начальной концентрации золы в газах. Возрастающие требования к качеству очистки дымовых газов от летучей золы привели в дальнейшем к вытеснению из энергетики батарейных циклонов и к замене их на более совершенные золоулавливающие установки.

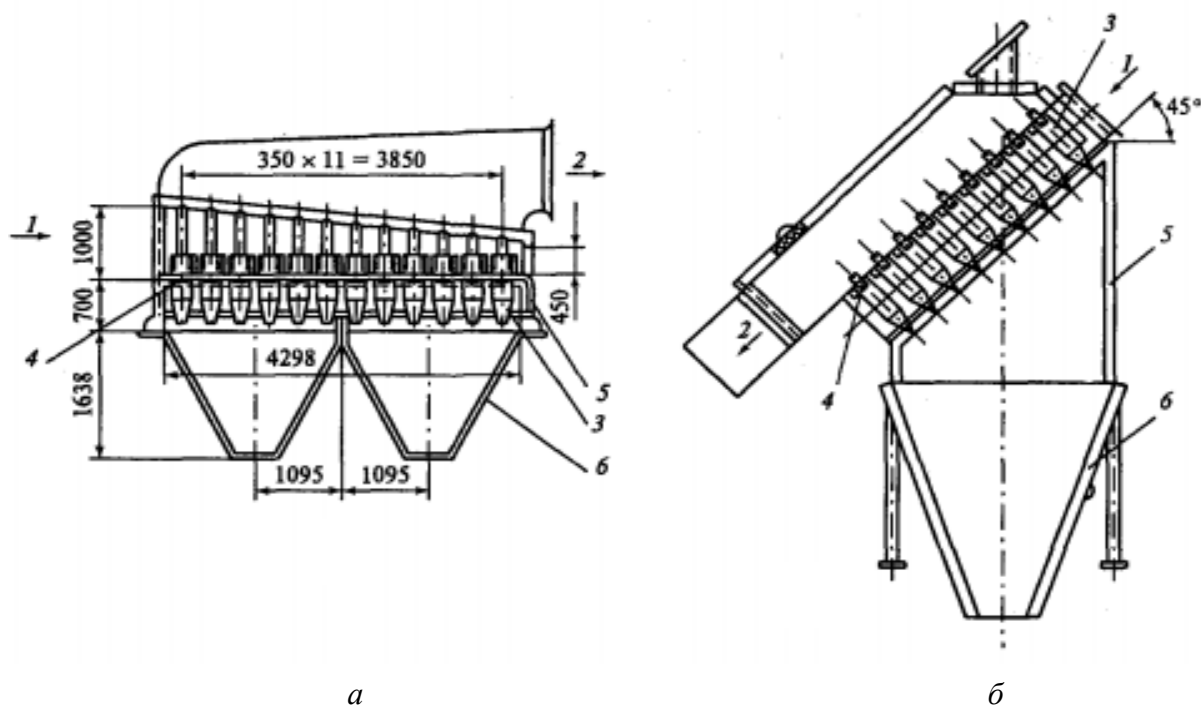


Рис. 2.3. Вертикальное (а) и наклонное (б) расположение циклонных элементов в батарее: 1 – вход неочищенных газов; 2 – выход очищенных газов; 3 – элемент батарейного циклона; 4 – трубная доска; 5 – корпус циклона; 6 – золовый бункер

Недостатком работы сухих циклонов была вероятность вторичного захвата осевшей на стенках золы, что снижало эффективность таких аппаратов. Для предотвращения вторичного уноса золы со стенок было использовано смачивание поверхности корпуса (мокрая газоочистка) стекающей пленкой воды. В этом случае практически все золовые частицы, достигшие стенок, удалялись вместе с водой в золовый бункер.

2.1.2. Мокрые инерционные золоуловители

Мокрые инерционные золоуловители были разработаны Всероссийским теплотехническим институтом (ВТИ) и получили название центробежного скруббера (ЦС). Степень улавливания летучей золы в ЦС ВТИ достигала 92 %.

Дальнейшее повышение степени золоулавливания было достигнуто при использовании предварительной коагуляции золовых частиц каплями воды в трубе Вентури (рис. 2.4), в которой в поток газа, движущегося с большой скоростью (50–70 м/с), впрыскивается через распылительные форсунки вода в количестве 0,15–0,2 кг на 1 м³ газа [8].

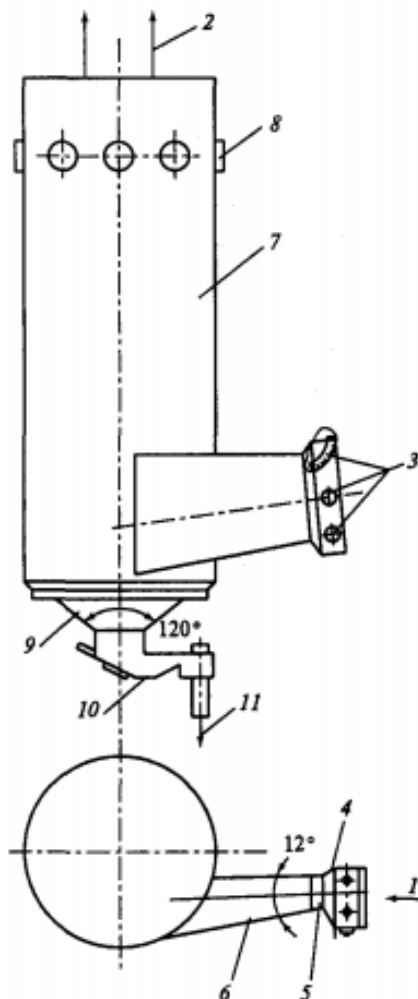


Рис. 2.4. Мокрый золоуловитель с коагулятором Вентури: 1 – вход запыленных газов; 2 – выход очищенных газов; 3 – сопла подачи воды в горловину трубы Вентури; 4–6 – конфузор, горловина и диффузор коагулятора Вентури; 7 – корпус каплеуловителя; 8 – подача воды для орошения стенок корпуса; 9 – бункер каплеуловителя; 10 – гидрозатвор; 11 – подача пульпы в канал золоудаления

Движущийся с большой скоростью газ при встрече с каплями воды дробит их до размера 200–300 мкм, вследствие чего резко возрастает общая смачивающая поверхность. Частицы золы соединяются с каплями воды (коагуляция), и эти достаточно крупные частицы эффективно осаждаются на пленке ЦС. Эффективность мокрого золоуловителя с предвключенным

коагулятором достигла 96 %. Их стали применять на котлах паропроизводительностью до 200 кг/с (670 т/ч). Однако и эта степень очистки газов позднее стала для энергетики недостаточной. Кроме того, в процессе эксплуатации мокрых золоуловителей обнаружился существенный недостаток, связанный с химическими процессами, протекающими при наличии в составе золы кальциевых соединений.

Большинство неполадок в работе мокрых золоуловителей является следствием уноса брызг: осаждающиеся на неорошаемой поверхности брызги приводят к образованию золовых отложений, увеличению аэродинамического сопротивления, дополнительным затратам электроэнергии на тягу, снижению нагрузки котла и преждевременной его остановке, а брызги на лопатках дымососов вызывают осаждение на них золы и разбалансировку рабочих колес.

Помимо этого, применение мокрых золоуловителей предполагает большой расход воды (удельный расход воды на очистку газов колеблется в пределах от 0,11 до 1,3 л/м³), что также является недостатком данного способа золоулавливания.

2.1.3. Электрофильтры

Для ТЭС большой мощности в связи с увеличением количества сжигаемого топлива и образующейся летучей золы возникла необходимость повысить эффективность очистки газов. Эту задачу можно решить с помощью электрофильтров, которые в настоящее время относятся к числу наиболее эффективных типов золоуловителя [8].

Преимуществом электрофильтров является способность улавливать золу с частицами 10 мкм и менее, поэтому они особенно эффективны при приготовлении пыли в шаровых барабанных мельницах. Электрофильтры очищают газы до концентрации твердых частиц в дымовых газах за фильтром порядка 50 мг/м³ и очищают газы на 99 %.

Принцип действия электрофильтра (рис. 2.5) базируется на создании неравномерного электрического поля высокой напряженности и образовании коронного разряда в окрестности коронирующих электродов, расположенных в корпусе электрофильтра [8]. Вокруг электрода, имеющего профиль с острыми углами, при напряженности электрического поля около 1,5 МВ/м возникает интенсивная ионизация дымовых газов в узкой области, прилегающей к электроду (зона *a*). Возникает коронный разряд, в результате которого из молекул дымовых газов выталкиваются отрицательно заряженные электроны и образуются положительно заряженные ионы

дымовых газов. Электроны под действием сил электрического поля приходят в движение в направлении от коронирующих к осадительным электродам (зона *b*). Встречая на своем пути частицы зола, электроны поглощаются на них и передают им свой отрицательный заряд (зона *c*). Теперь уже частицы зола движутся по направлению к осадительным электродам, где и осаждаются (зона *d*) под действием сил электростатического поля и адгезии (сцепления).

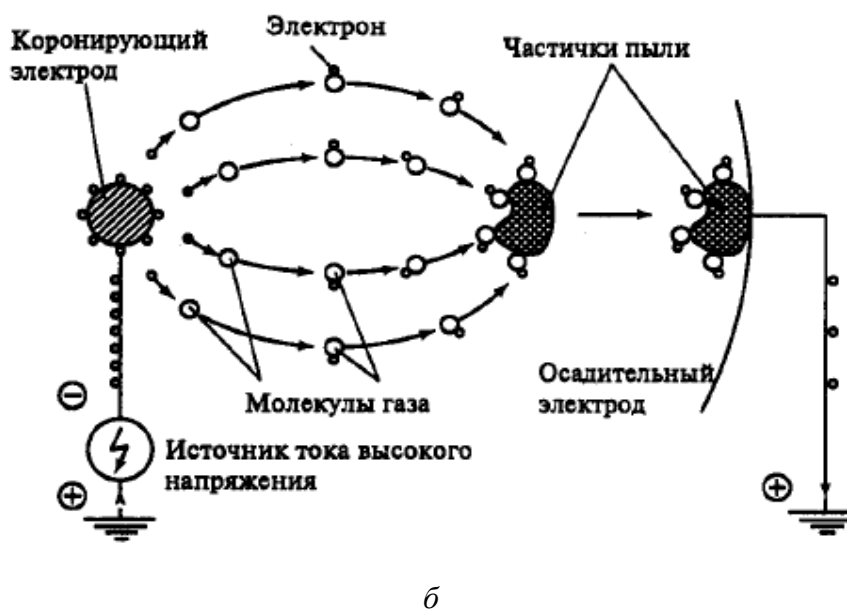
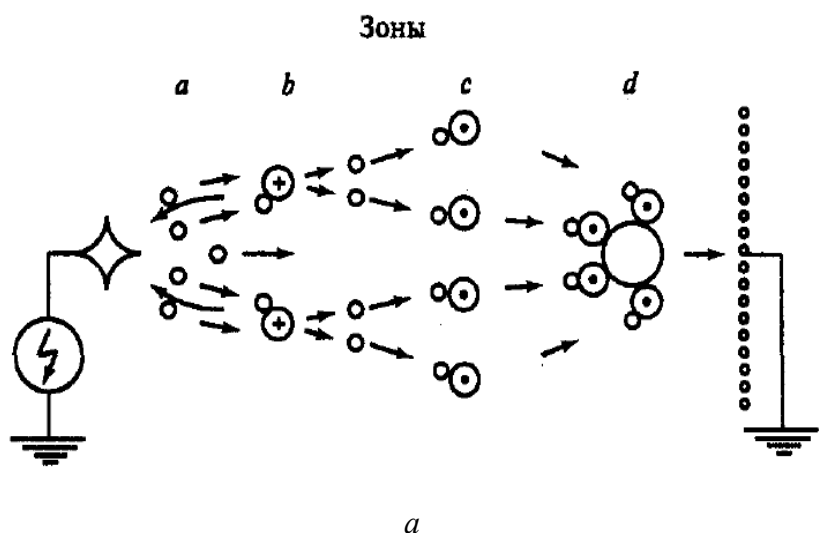


Рис. 2.5. Процесс ионизации (*a*) и принцип работы (*б*) электрофильтра

У электрофильтров горизонтальных типа А(ЭГА) широкополосные (ширина 640 мм, высота – 6; 7,5; 9; 12 и 15 м) осадительные электроды (рис. 2.6), имеющие одинаковый электрический потенциал, связываются между собой в жесткую систему, состоящую из четырех-восьми элементов. Это дает активную зону от 2,56 до 6,12 м.

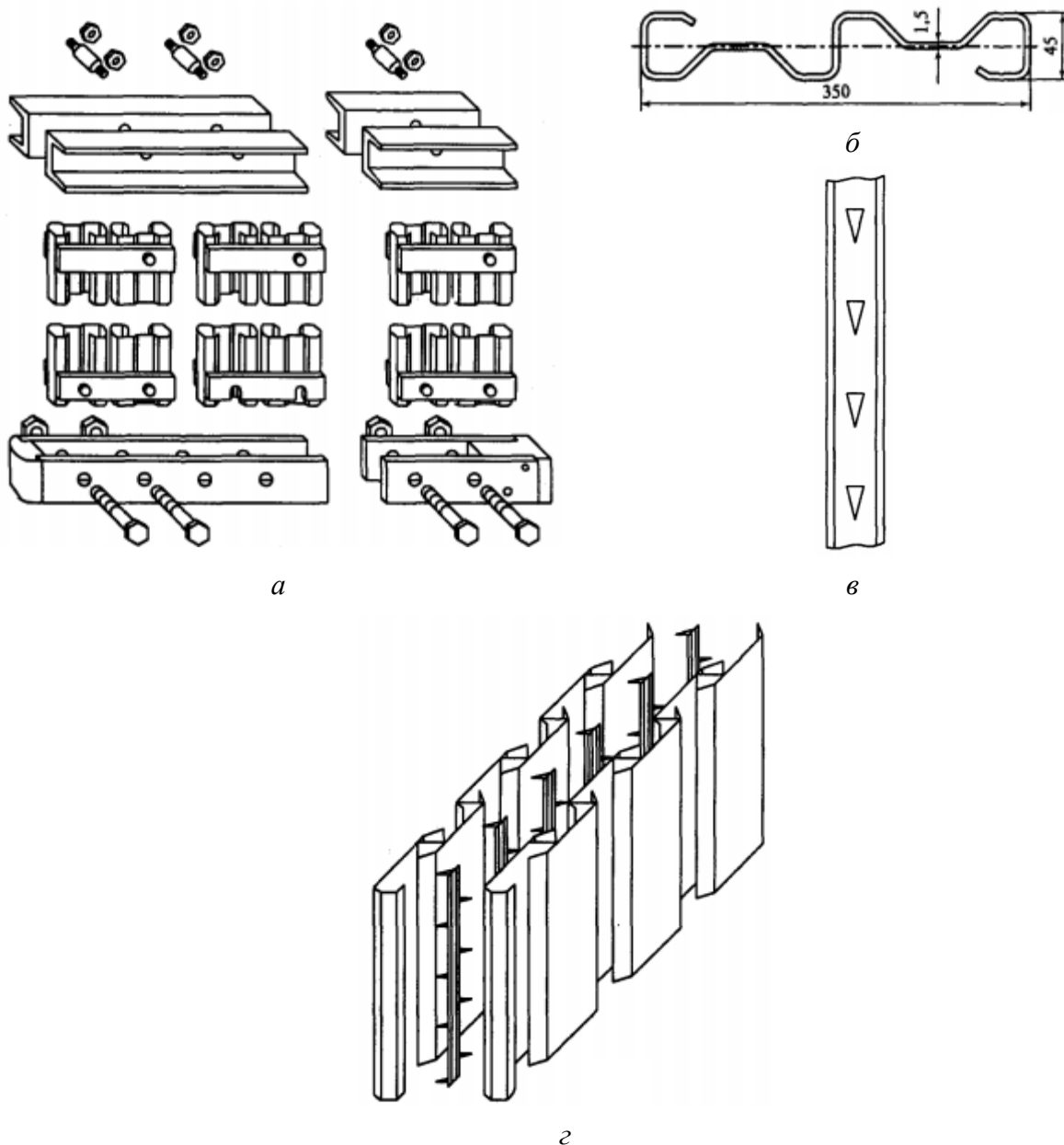


Рис. 2.6. Электроды электрофильтра: *а* – симметричные С-образные элементы осадительного электрода; *б* – широкополосный С-образный элемент осадительного электрода; *в* – коронирующий игольчатый электрод; *г* – схема взаимного расположения осадительных и коронирующих электродов

Профильно-пластинчатые осадительные электроды обеспечивают хорошее удержание золы в углубленных их частях, достаточно жесткую конструкцию и минимальный расход металла. Осадительные электроды заземляются.

Коронирующие электроды устанавливаются между осадительными электродами с шагом 325 мм и крепятся к рамам, подвешенным к опорно-проходным изоляторам. Для получения наивысшей напряженности электрического поля коронирующие электроды должны иметь заостренную форму,

поэтому применяются коронирующие электроды с фиксированными точками разряда – ленточно-игольчатые в виде узких полос с выштампованными иголками, на концах которых достигается наивысшая напряженность электрического поля.

Подвод электрического тока (заряда) высокого напряжения к коронирующим электродам электрофильтров (60–80 кВ) осуществляется агрегатами питания. Агрегат питания состоит из регулятора напряжения, повышающего трансформатора и выпрямителя. Для обеспечения оптимального режима питания напряжение на электродах следует поддерживать на максимально высоком уровне, но ниже пробивного. Для регулирования выходного тока и напряжения агрегата питания используются магнитные усилители и тиристоры (управляемые кремниевые диоды). Агрегаты питания оснащаются полупроводниковыми селеновыми или кремниевыми выпрямителями. Агрегаты питаются от сети напряжением 380 В, среднее выпрямленное напряжение составляет 50 кВ, а амплитудное значение достигает 80 кВ. Желательно на каждую систему осадительных электродов («на каждое поле») устанавливать самостоятельный агрегат питания.

Очистка осадительных электродов от золы производится встряхивающими ударно-молотковыми механизмами.

Эффективность работы золоуловителя, в том числе и электрофильтра, согласно теории золоулавливания, оценивается параметром золоулавливания Π [8]:

$$\Pi = \frac{vA}{V} = \frac{vA}{u\omega}, \quad (2.1)$$

где v – скорость движения частиц золы под действием сил осаждения к поверхности осаждения (скорость дрейфа), м/с; A – площадь поверхности осаждения, м; V – объемный расход дымовых газов, м³/с; u – средняя скорость движения пылегазового потока, м/с; ω – сечение для прохода газов, м².

Применительно к электрофильтру площадь поверхности осаждения

$$A = 2mnL_{\Pi}H, \quad (2.2)$$

где m – число проходов для газов; n – число полей по ходу газов; L_{Π} – длина одного поля, м; H – высота электродов, м.

Сечение для прохода газов определяется по формуле:

$$\omega = 2mtH, \quad (2.3)$$

где t – расстояние между коронирующими и осадительными электродами, м.

Таким образом, параметр золоулавливания для электрофилтра будет равен:

$$\Pi = \frac{vnL_{\Pi}}{ut}. \quad (2.4)$$

Формула (2.4) выведена для работы электрофилтра в идеальном случае, когда отсутствует вторичный унос, обеспечивается равномерный поток газов, нет движения запыленного потока через неактивные зоны электрофилтра и отсутствуют другие факторы, влияющие на золоулавливание.

На основе обобщения данных испытаний отечественных электрофилтров было получено полуэмпирическое выражение для параметра золоулавливания:

$$\Pi = 0,2k_{\text{УН}} \sqrt{\frac{vnL_{\Pi}}{ut}},$$

где $k_{\text{УН}}$ – коэффициент вторичного уноса.

Согласно теории золоулавливания параметр золоулавливания связан со степенью проскока летучей золы следующим образом:

$$\varepsilon = \frac{C_{\text{ВЫХ}}}{C_{\text{ВХ}}} = \exp(-\Pi), \quad (2.5)$$

где $C_{\text{ВХ}}$ и $C_{\text{ВЫХ}}$ – концентрации летучей золы в дымовых газах, кг/м³.

Тогда степень золоулавливания

$$\eta = 1 - \varepsilon. \quad (2.6)$$

Для электрофилтра параметр золоулавливания и, следовательно, степень золоулавливания возрастает с увеличением эффективной скорости дрейфа (скорости осаждения) частиц v , числа полей n электрофилтра и длины каждого поля L_{Π} и уменьшается с ростом скорости дымовых газов u и расстояния t между коронирующими и осадительными электродами.

Также на работу электрофилтра существенное влияние оказывает удельное электрическое сопротивление (УЭС) золы ρ_y , Ом/см. На рис. 2.7 показана зависимость ρ_y от температуры дымовых газов и от содержания в топливе серы S^p .

В зависимости от величины УЭС в настоящее время пыли принято разделять на три группы [11].

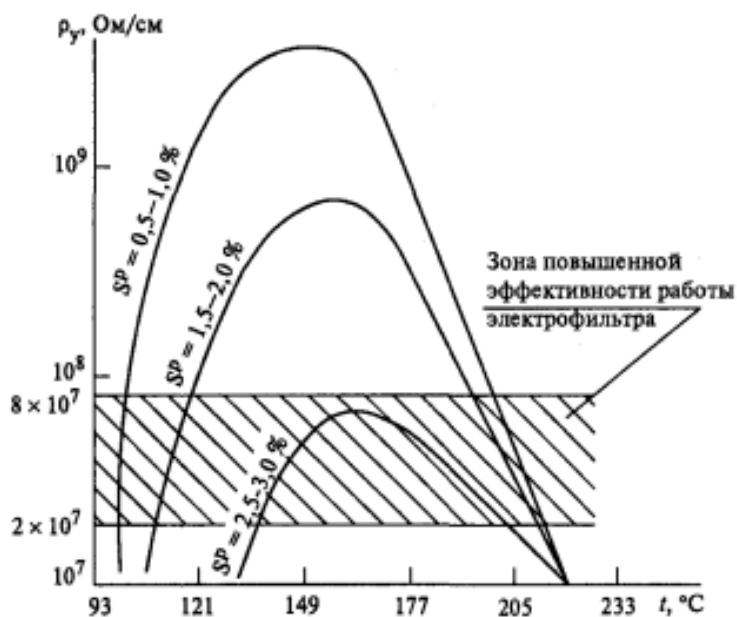


Рис. 2.7. Зависимость электрического сопротивления золы от температуры и концентрации в топливе серы S^P

Пыли первой группы (УЭС менее 10^2 Ом·м), например, технический углерод, при осаждении на осадительный электрод быстро теряют свой заряд и могут снова уноситься с газовым потоком, если скорость газа превышает 0,5 м/с. Скорость дрейфа при улавливании в ЭФ таких пылей обычно не превышает 0,06 м/с.

Для успешного улавливания пылей первой группы скорость газов в активной зоне должна быть существенно снижена. Для снижения скорости газов у поверхности осадительного электрода могут применяться перфорированные перегородки, устанавливаемые на осадительные электроды поперек хода газа [11].

Пыли второй группы (величина УЭС колеблется в пределах от 10^2 до 10^8 Ом·м) улавливаются в ЭФ наиболее эффективно. Скорость дрейфа при их осаждении в ЭФ составляет 0,07–0,15 м/с. При этом скорость газов в ЭФ составляет 0,8–1,2 м/с.

Пыли третьей группы (УЭС более 10^8 Ом·м) наиболее трудно улавливаются в ЭФ. При их осаждении на осадительном электроде происходит большое падение напряжения в слое и пробой слоя, сопровождающийся выбросом положительных ионов и частиц пыли в межэлектродный промежуток. Скорость дрейфа частиц при улавливании пылей третьей группы обычно не превышает 0,3–0,4 м/с. Если улавливается мелкая пыль, вызывающая значительное запыление коронного разряда, то возможно снижение скорости дрейфа ниже 0,3 м/с.

Высокой степени очистки дымовых газов малосернистых углей с высоким удельным электрическим сопротивлением летучей золы можно достичь, в основном, двумя способами:

1) размещением электрофильтра до воздухоподогревателя в зоне относительно высоких температур газов (200–300 °С), когда удельное сопротивление золы резко падает;

2) кондиционированием дымовых газов, осуществляемым впрыском химического агента, снижающего удельное электрическое сопротивление летучей золы (вода, аммиак, сернистый ангидрид, известковое молоко и другие вещества). Удобной оказалась установка мокрого золоуловителя – скруббера – перед электрофильтром (рис. 2.8).

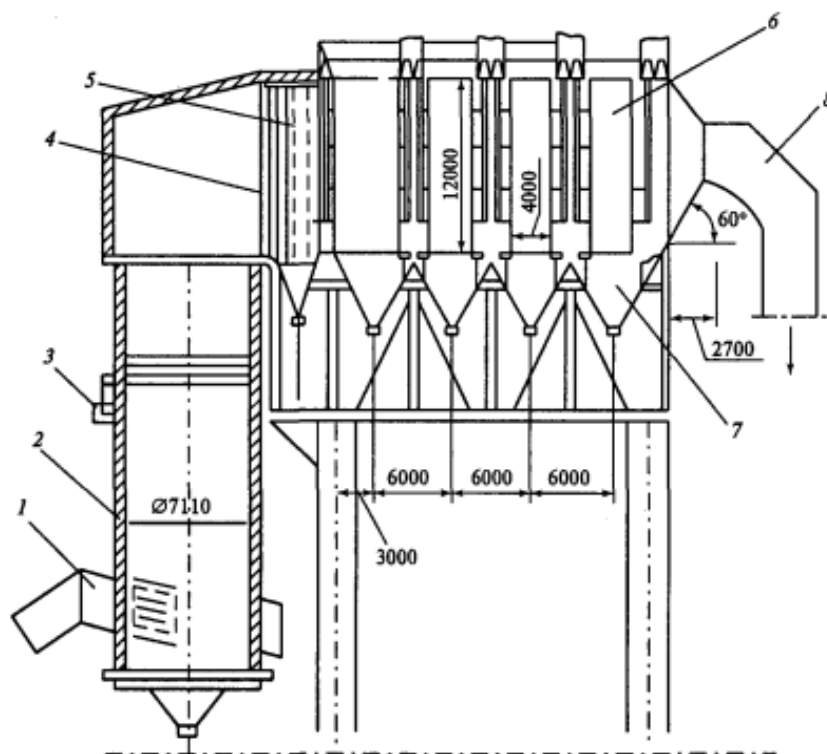


Рис. 2.8. Двухступенчатый золоуловитель для золы топлив с высоким удельным электрическим сопротивлением: 1 – вход запыленных газов; 2 – мокрый скруббер; 3 – подвод орошающей воды мокрого скруббера; 4 – швеллерная решетка для задержания капель; 5 – газораспределительные решетки; 6 – система осадительных электродов; 7 – бункера для уловленной золы; 8 – выход очищенных и увлажненных дымовых газов

Одной из причин ухудшения работы электрофильтров является высокая концентрация золы в дымовых газах, что наблюдается при многозольных топливах с приведенным параметром $A^n > 10$. В этом случае рекомендуется комбинировать электрофильтры с предвключенными механическими золоуловителями, в частности, с батарейными циклонами.

На степень улавливания большое влияние оказывает скорость газов, причем в отличие от циклонных золоуловителей степень улавливания золы в электрофильтрах растет с уменьшением скорости. Поэтому для углей с высоким удельным электрическим сопротивлением золы приходится принимать малые скорости газового потока ($u = 1 \div 1,2$ м/с), а для прочих топлив $u = 1,6 \div 1,8$ м/с. Для газового потока с низкой скоростью необходима установка электрофильтров очень большого поперечного сечения, что ведет к большим расходам металла и высоким капитальным затратам.

Подводя итоги, можно утверждать, что эффективность работы электрофильтра во многом зависит от равномерности поступающего потока, а также от рациональной организации потока в электрофильтре. Необходимо обеспечить равномерный по сечению поток и отсутствие проскока части запыленного газа в бункера под полями электрофильтров.

Для глубокой очистки дымовых газов для экологически безопасных ТЭС требуются многопольные электрофильтры с числом полей от 4 до 8. Чтобы обеспечить требуемую малую скорость движения дымовых газов в электрофильтре, из-за большого расхода газов применяется двухъярусная компоновка электрофильтров. При этом зола из верхнего яруса просыпается в бункера нижнего яруса через щели, образованные осадительными электродами нижнего яруса, из которого частично удалены коронирующие электроды.

Как уже отмечалось, для удаления золы углей с неблагоприятными электрофизическими свойствами приходится прибегать к кондиционированию поступающих в электрофильтр дымовых газов. Так, перед электрофильтрами, улавливающими золу, устанавливаются мокрые скрубберы, где благодаря подаче в поток дымовых газов воды происходит снижение их температуры на 30–50 °С с одновременным увеличением их влажности. Это приводит к снижению удельного электрического сопротивления золы и к лучшему ее улавливанию в электрофильтре. При этом можно получить очистку дымовых газов до концентрации порядка 30–50 мг/м и $\eta = 99,8$ %.

2.1.4. Тканевые фильтры

Поскольку электрофильтры плохо улавливают частицы размером 10 мкм и меньше, их начали заменять рукавными фильтрами, в которых фильтрация осуществляется через гибкую ткань, изготавливаемую из тонких нитей диаметром 100–300 мкм. Благодаря цилиндрической форме эти фильтры получили название рукавных (рис. 2.9) [8].

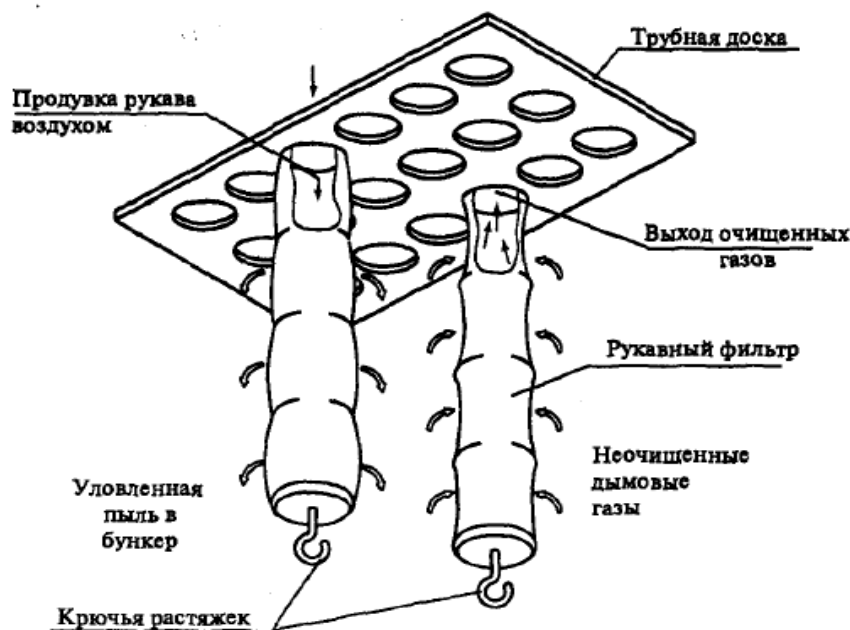


Рис. 2.9. Устройство и принцип действия тканевого рукавного фильтра с подачей запыленного потока с периферии в рукав: рукава в режиме очистки продувкой воздухом (слева) и дымовых газов (справа)

Кроме рукавных тканевых фильтров находят применение и карманные тканевые фильтры.

При использовании тканевых фильтров необходимо соблюдать ряд условий.

1. Скорость газового потока через ткань должна быть очень низкой – порядка 0,01–0,02 м/с, а гидравлическое сопротивление – вынужденно высоким (около 0,5–1,5 кПа).

2. С целью удаления осевшей на ткани золы применяется механическое встряхивание либо продувка воздухом в обратном направлении, причем на это время очищаемая секция, как правило, должна отъединяться от газового потока шиберами. Фильтры с регенерацией встряхиванием имеют специальные колотушки, расположенные на наклонных рамах, на которых крепятся рукава. В связи с тем, что к недостаткам этого метода относится быстрый (1–3 года) износ (дефекты в ткани либо рост ее сопротивления из-за склеивания пор) ткани рукава (особенно стеклоткани), используют вибраторы, осуществляющие горизонтальные трясущие либо полоскательные движения рукавов. Такие фильтры конструктивно выполняются многокамерными с подачей дымовых газов внутрь рукавов.

Регенерация фильтра (из игольчатого войлока) осуществляется с помощью сжатого воздуха низкого давления (не превышает 104 Па) либо воздухом при высоком избыточном давлении (рис. 2.10). Такая регенерация

является щадящей и срок эксплуатации рукавов достигает 16 тыс. ч. В фильтрах этого типа дымовые газы подаются в рукав всегда снаружи (с периферии). Для регенерации фильтров кратковременно сверху вниз в рукав «выстреливают» струю воздуха при высоком давлении со скоростью звука. Происходят встряхивание и деформация рукава, который вздувается, благодаря чему слой пыли стекает вниз и удаляется (рис. 2.11). Можно регенерировать как отдельные рукава, так и ряды рукавов, отключать подачу дымовых газов в этом случае не обязательно. Процесс регенерации продолжается от 100 до 300 мс. Для таких фильтров нет необходимости иметь многокамерную конструкцию.

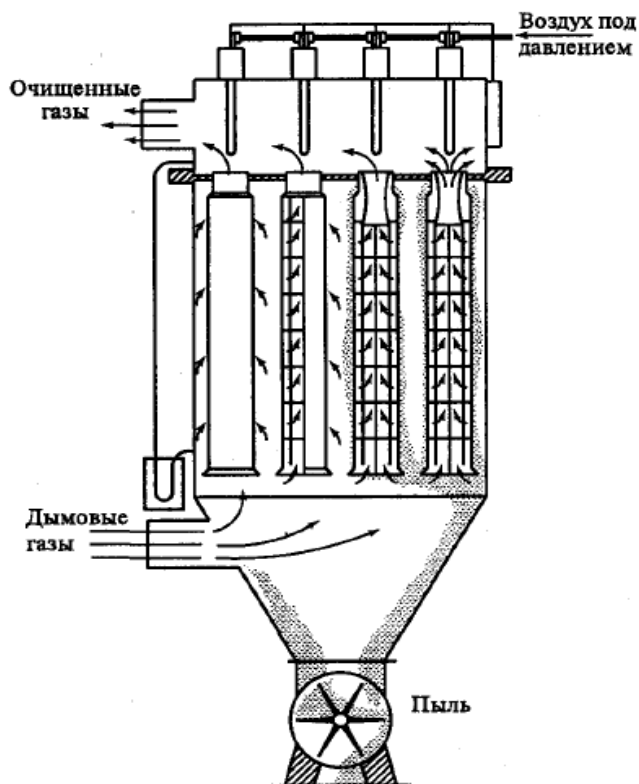


Рис. 2.10. Тканевый рукавный фильтр

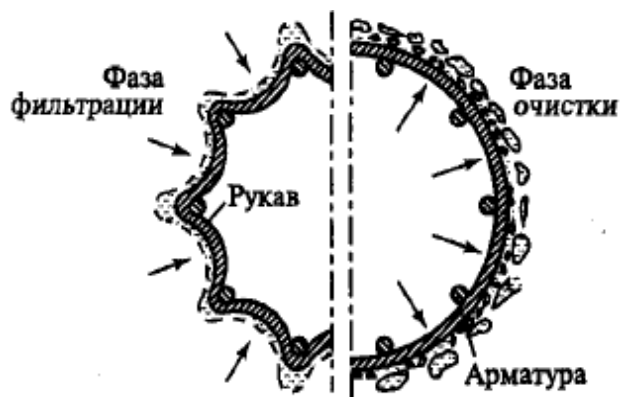


Рис. 2.11. Фазы функционирования тканевого рукавного фильтра

3. Тканевые фильтры должны быть изготовлены из материала, выдерживающего высокую температуру уходящих газов котла, стойкого к повышенной влажности и влиянию химических соединений: при температуре газов до 130 °С – шерсть/шерстяной войлок, до 250 °С – оксалин, около 260 °С – стекловолокно/стекловолокно с графитом.

На рис. 2.12 схематично представлена конструкция многокамерного рукавного фильтра. Число рукавов в одной камере может быть 100 и более.

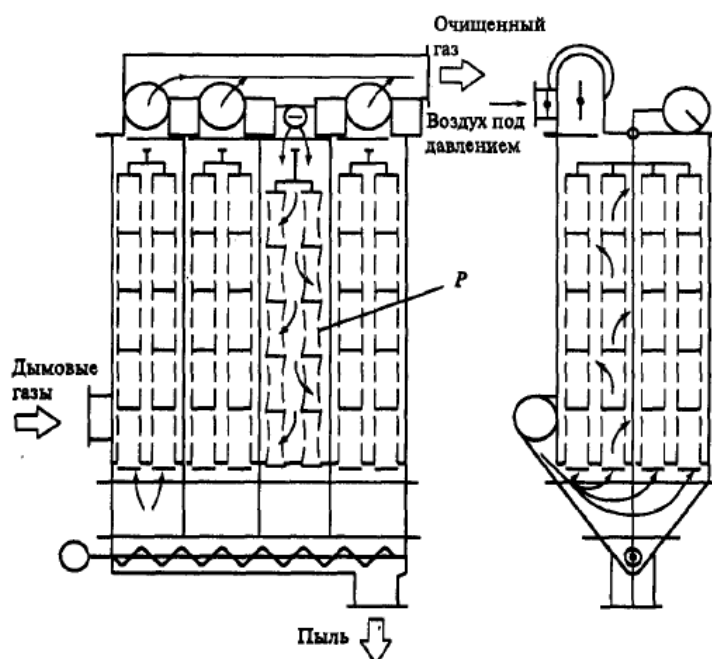


Рис. 2.12. Многокамерный рукавный фильтр (4 камеры по 8 рукавов) с подачей запыленного потока снизу внутрь рукавов: Р – секция на регенерации с продувкой воздухом под давлением снаружи внутрь рукавов

Дымовые газы проходят снизу внутрь рукавов, осаждение частиц пыли осуществляется на внутренней поверхности стенки рукава. При регенерации одна из камер с помощью клапана отключается от подачи дымовых газов и прилипшие к ткани слои пыли удаляются с помощью встряхивания или вибрации рукавов. Кроме того, отделению пыли способствует струя сжатого воздуха, направляемая против движения процесса фильтрации. Отделившаяся пыль падает в пылесборник, находящийся под рукавами и удаляется с помощью шнеков из фильтровального помещения.

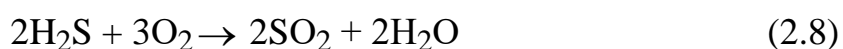
По капитальным и эксплуатационным затратам тканевые фильтры и электрофильтры приблизительно одинаковые, однако тканевые электрофильтры проще в эксплуатации и более эффективны, позволяют довести степень очистки дымовых газов до 99 % и снизить содержание золых частиц в уходящих газах котлов ТЭС до 35–50 мг/м, что соответствует показателям экологически безопасных ТЭС.

2.2. Снижение выбросов оксидов серы

Наличие в дымовых газах ТЭС диоксида серы обусловлено постоянным присутствием в твердом и жидком топливе (и в природном газе некоторых месторождений) различных соединений серы – сульфидов и органических соединений [8]. При окислительном сжигании топлива сера окисляется до диоксида:



Восстановительное сжигание для получения генераторного газа производит сероводород H_2S , который затем сгорает, образуя тот же диоксид:



Диоксид серы SO_2 , содержащийся в дымовых газах, практически не влияет на процесс производства энергии. Триоксид серы SO_3 обуславливает сернокислотную точку росы. По ней выбирают температуру уходящих газов из котлов, и она является одним из основных факторов эффективной работы газоочистки.

Но практическое отсутствие воздействия SO_2 на процесс производства энергии «компенсируется» активным воздействием этого вещества на окружающую среду: диоксид серы в атмосфере при воздействии озона, образующегося из кислорода воздуха под действием солнечного света, окисляется до триоксида серы SO_3 , который соединяется с водяным паром и образует пары серной кислоты.

Расчеты показывают, что примерно 50 % SO_2 выпадает из дымовых газов на почву в радиусе 15–25 высот дымовых труб. Этим объясняется принятое в большинстве промышленно развитых стран законодательство по диоксиду серы: обеспечивать не только заданную концентрацию в выбрасываемых в воздух газах, но и степень улавливания SO_2 (около 60 % для котлов малой мощности и 90 % для котлов большой мощности).

Сокращение выбросов соединений серы на ТЭС может быть осуществлено тремя способами: путем очистки топлива от соединений серы до его сжигания, связыванием серы в процессе горения и в результате очистки дымовых газов.

2.2.1. Очистка топлива от соединений серы до его сжигания

Очистка жидких топлив от серы широко применяется в ряде стран: Японии, США, Мексике и некоторых других. Используются преимущественно два метода – прямой и косвенный [8].

Прямой метод очистки жидкого топлива подразумевает обработку путем каталитического гидрирования с выделением серы в виде сероводорода и последующим восстановлением его до элементарной серы.

Метод косвенной очистки заключается в вакуумной перегонке топлива.

В твердом топливе (ископаемом угле) сера может находиться в виде органической и (или) колчеданной серы. Основную часть колчеданной серы (FeS_2) можно достаточно легко удалить путем обогащения, поскольку она находится в углях в виде отдельных включений.

Сложнее обстоит дело с органической серой, ибо она входит в состав горючей массы и удалить ее очень сложно.

Самым радикальным методом удаления серы является газификация топлива. Перевод твердого или жидкого топлива в газообразное состояние производится путем неполного окисления при высокой температуре с одновременным удалением вредных примесей, являющихся побочными продуктами. Сера выводится из топлива в этом случае большей частью в виде соединения H_2S (сероводорода). После такого выделения серы горючий газ может быть далее использован в парогазовых установках для производства электроэнергии с высоким КПД.

Процесс газификации угля происходит по следующей химической реакции:



При этом часть угля не газифицируется, а углерод сгорает полностью:



Образующийся углекислый газ реагирует далее с раскаленным углеродом по формуле:



При этом КПД газификации составляет 80–85 %, а в сочетании с парогазовой установкой КПД ПТУ может достигать 42 %. Под КПД газификации здесь понимается отношение массы образующихся газов к горючей массе исходного твердого топлива.

2.2.2. Связывание соединений серы в процессе горения

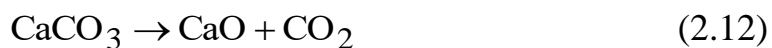
Связывание серы в процессе сжигания топлива в кипящем (псевдооживленном) слое является наиболее распространенным. Такой способ позволяет значительно уменьшить содержание оксидов серы и азота в дымовых газах

по сравнению с камерным процессом. Процесс сжигания происходит в кипящем слое твердых частиц размолотого известняка, в который погружены поверхности нагрева котлоагрегата. Преимущество такого способа по сравнению с камерным процессом заключается в более интенсивном теплообмене в топочном устройстве, где поверхности нагрева соприкасаются с движущимися раскаленными частицами. Кроме того, эта технология позволяет примерно на 90 % химически связывать серу, содержащуюся в топливе в процессе его сгорания.

Для образования кипящего слоя на неподвижной решетке, через которую подается воздух под давлением, используется смесь дробленого угля с размерами частиц 1,5–6 мм, инертного материала (песка, золы и др.) и известняка. Под действием восходящего потока воздуха образуется суспензионный кипящий слой. По сравнению с исходным (плотным) слоем кипящий слой увеличивается в объеме в 1,5–2 раза в зависимости от интенсивности дутья, формы и размеров частиц. При этом в 1 м³ кипящего слоя в процессе горения участвует 400–600 кг твердого топлива.

Одновременно с процессом горения протекает процесс десульфуризации, поскольку в кипящий слой непрерывно вводится известняк, который состоит в основном из CaCO₃.

Реакция десульфуризации протекает при температуре 800–850 °С в следующей последовательности [8]:



В результате реакции образуется гипс. Эффективность удаления серы в этом случае зависит от количества известняка. Поддержание соотношения Ca/S примерно в 1,5 раза больше стехиометрического, по зарубежным данным, позволяет на 80 % связать SO₂ и на выходе из топки получать его концентрацию до 200 мг/м³.

На рис. 2.13 приведена принципиальная схема котла с топкой кипящего слоя.

Оптимальная температура процесса горения составляет приблизительно 850 °С, что позволяет резко снизить образование оксидов азота. Реализация этого способа сжигания топлива дает ряд и других преимуществ. Так, трубы поверхностей нагрева котла, находящиеся в непосредственном контакте с кипящим слоем, имеют коэффициент теплоотдачи к ним более высокий, чем при радиационном теплообмене. Но главным достоинством этого способа сжигания топлива является все же связывание более 80 % серы [7].

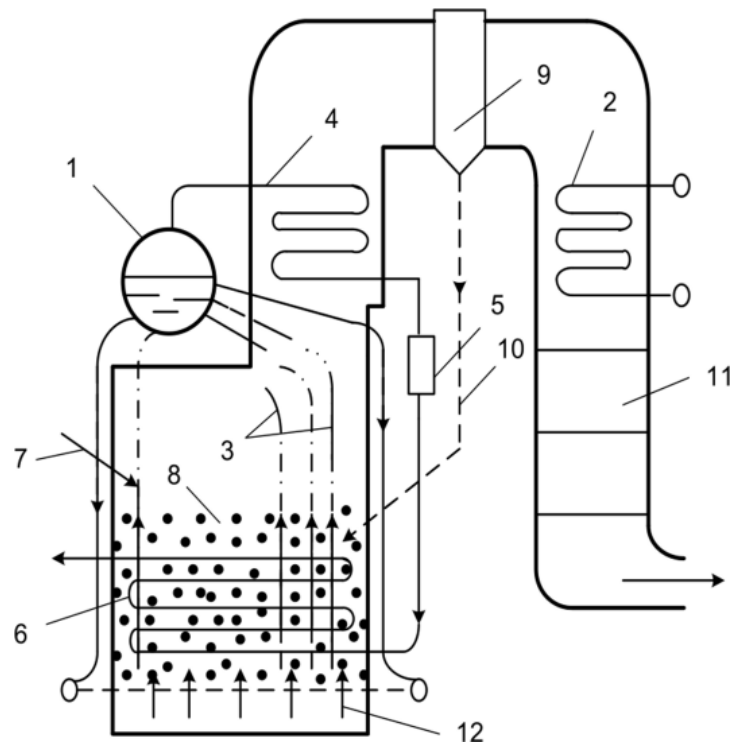


Рис. 2.13. Принципиальная схема котла с топкой кипящего слоя с размещением испарительных и пароперегревательных поверхностей в слое: 1 – барабан котла; 2 – экономайзер; 3 – испарительные поверхности; 4 – конвективный пакет пароперегревателя; 5 – пароохладитель; 6 – выходной пакет пароперегревателя; 7 – подача топлива; 8 – кипящий слой; 9 – сепаратор пыли; 10 – возврат пыли в кипящий слой; 11 – воздухоподогреватель; 12 – подача воздуха в кипящий слой

Для организации глубокого выгорания топлива целесообразно обеспечить его многократную циркуляцию в топке с кипящим слоем (ЦКС) путем увеличения расхода (скорости) воздуха.

В топку с кипящим слоем подаются известняк, песок, гранулированная зола или другой зернистый материал, образующий с дробленным углем плотный суспензионный кипящий слой под действием восходящего потока воздуха, поступающего через решетку в нижней части топки. Горючие вещества сгорают при 760–980 °С. При такой температуре зола не спекается и не размягчается и процесс горения протекает эффективно.

Процесс десульфуризации топочных газов идет одновременно с процессом горения. Продукты сгорания поднимаются в верхнюю часть топки и попадают в циклон. Из циклона инертная масса, несгоревшие частицы топлива и непрореагировавший известняк возвращаются обратно в топку. Трубы поверхностей нагрева располагаются в кипящем слое и в конвективной шахте. Для подачи воздуха под раздающую плиту используется высоконапорный дутьевой вентилятор.

В нижней части циклона обеспечивается его уплотнение благодаря установке золотого затвора. Для регулирования в топке температуры возвращаемую туда золу охлаждают в золопаровых и золоводяных теплообменниках.

К достоинствам топок с ЦКС в отношении экологии следует отнести высокую степень связывания SO_2 и снижение концентрации NO_x в уходящих газах. Предельно допустимая концентрация (ПДК) NO , безопасная для здоровья людей, в воздухе населенных пунктов составляет $0,08 \text{ мг/м}^3$. В рабочей зоне производственных помещений допускается концентрация NO не более 5 мг/м^3 . Недостатком является увеличение золоотвала на объем известняка, используемого для связывания серы.

В России и за рубежом эксплуатируются различные топки с кипящим слоем, в том числе, для котлов большой паропроизводительности, а также топки, работающие под давлением (до 1 МПа).

В промышленности применяются технологические топки с кипящим слоем, в частности, для обжига различных серосодержащих материалов (колчедана, медных и цинковых концентратов и др.). Для поддержания температуры слоя на уровне, исключающем его ошлакование, в кипящем слое располагают теплообменные поверхности (испаритель, пароперегреватель) предназначенные для выработки водяного пара или нагрева воды. Теплообменные поверхности обеспечивают снижение температуры в слое до $850\text{--}900 \text{ }^\circ\text{C}$.

Таким образом, основными, присущими только кипящему слою особенностями сжигания топлива является [13]:

1) интенсивное перемешивание частиц топлива газовыми пузырями, позволяющими избежать появления в слое существенных температурных перекосов, и как следствие, шлакования;

2) интенсификация теплопередачи от кипящего слоя к теплопередающим поверхностям: частица твердого материала, охлаждаясь у поверхности трубы, омываемой рабочим телом, из-за различия плотностей отдает на несколько порядков теплоты больше, чем такая же по объему частица газа, охлаждающаяся до той же температуры (коэффициент теплоотдачи к погруженным в кипящий слой трубам составляет в современных топках $\sim 250 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$).

3) интенсификация горения твердого топлива, которая объясняется увеличением удельной поверхности окисления и постоянным «обновлением» его поверхности, благодаря интенсивной пульсации, вращению, соударениям, дроблению и истиранию в мельчайшую пыль.

В топках с кипящим слоем сжигается угольная мелочь бурых и каменных углей (размеры кусков колеблются в пределах от 2 до 12 мм).

Во избежание шлакования, температура слоя регулируется вводом пара в количестве 0,3–0,6 кг/кг. Возможна замена пара водой, распыленной при помощи пульверизаторов (расход воды 0,2–0,3 кг/кг).

К недостаткам топок с кипящим слоем относят [14]:

1) вынос углерода до 20–30 % всего углерода топлива (поэтому эти топки рекомендуют применять при возможности дожигания уноса 0–1 мм в рабочем пространстве котла);

2) зашлаковывание межсоплового пространства и самих сопел воздухораспределительных колосниковых решеток при недостаточном динамическом напоре воздуха;

3) абразивный износ теплопередающих поверхностей, особенно высокий у погружных в кипящий слой.

2.2.3. Очистка дымовых газов от соединений серы

Все известные на сегодня способы организации технологического процесса удаления сернистого ангидрида из дымовых газов можно классифицировать следующим образом:

- абсорбционные (например, абсорбция на основе аммиака);
- адсорбционные (например, адсорбция на поверхности активированного угля);
- хемосорбционные.

Вышеперечисленные способы можно разделить на мокрые и сухие в зависимости от того, в какой фазе происходит процесс связывания сернистого ангидрида.

Наиболее широкое распространение получили мокрые абсорбционные методы, использующие для связывания сернистого ангидрида промывочные растворы со щелочными свойствами [14]:

- абсорбция SO_2 с помощью основных щелочных соединений (используется при возможности регенерации абсорбента из-за его дороговизны);

- абсорбция SO_2 с помощью щелочно-земельных соединений с выделением конечного продукта, пригодного для дальнейшего применения (опасность образования в оборудовании трудноудаляемых отложений, конечный продукт – гипс);

- абсорбция SO_2 с помощью так называемого двойного щелочного способа, при котором щелочной абсорбент регенерируется с помощью щелочно-земельного соединения с выделением конечного продукта, пригодного для дальнейшего применения;

- абсорбция SO_2 с помощью соединений аммония, где в результате процесса получается серная кислота и сера.

К сухим способам очистки можно отнести [14]:

- сухой аддитивный способ (хемосорбция), при котором щелочно-земельные соединения (в основном известняк) непосредственно вдуваются в топку или подаются туда вместе с топливом. Способ имеет относительно низкую эффективность (процессы «Bergbau Frschung», Германия; «НОКСО», США и др.);

- хемосорбция SO_2 с применением окиси меди (метод «УОП-Шель»);

- каталитическое окисление SO_2 в SO_3 с получением серной кислоты (процесс «WSA», разработанный фирмой «Haldor Topse», Дания);

- адсорбция SO_2 с применением активированного угля или кокса, с получением в качестве конечного продукта разбавленной серной кислоты или гипса;

- радиационно-химическая обработка дымовых газов с одновременной очисткой от оксидов серы и азота (радиолиз), разрабатывается фирмой «Штейнмюллер» (Германия), в России – СО РАН («Институт Ядерной Физики»). При радиолизе поток дымовых газов после ввода в него аммиака облучается пучком ускоренных электронов, а конечным продуктом процесса является сульфат и нитрат аммония.

Мокроизвестняковый способ очистки дымовых газов от SO_2

Мокроизвестняковый способ (МИС) основан на интенсивной промывке дымовых газов в абсорбере, установленном за высокоэффективным золоуловителем, известняковой суспензией с получением двухводного гипса. Эта технология является абсолютно безопасной, поскольку и известняк, и гипс – нейтральные малорастворимые вещества [8].

В основе этого процесса лежит химическая реакция, протекающая при контакте дымовых газов с известняком в объеме распыленной суспензии известняка с образованием твердого сульфита кальция и углекислого газа:



Процесс протекает в абсорбере башенного циркуляционного типа. В нижней части абсорбера накапливается суспензия сульфита кальция. При барботаже воздуха через слой этой суспензии происходит доокисление сульфита кальция в двухводный сульфат кальция (гипс) по реакции:



На примере Губкинской ТЭЦ рассмотрим схему сероочистки, основанную на методе абсорбции диоксида серы путем промывки газов суспензией известняка.

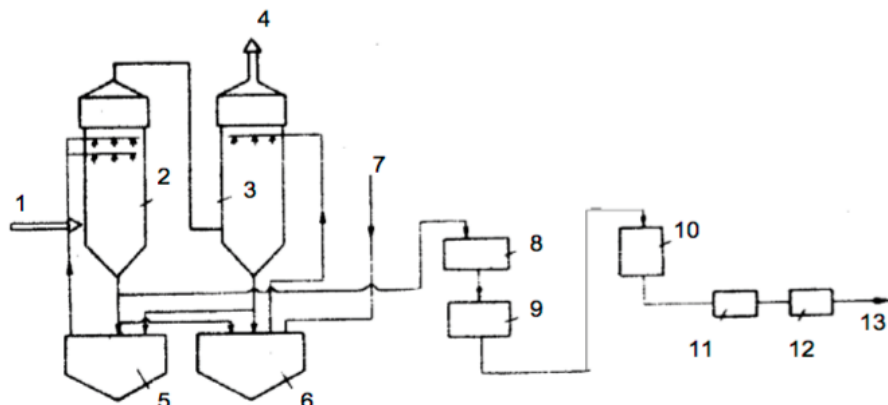


Рис. 2.14. Схема установки Губкинской ТЭЦ: 1 – дымовые газы от котла; 2, 3 – абсорберы 1-й и 2-й ступеней; 4 – выход очищенных газов к дымовой трубе; 5, 6 – циркуляционные сборники; 7 – линия подачи известняковой суспензии; 8 – сгуститель пульпы; 9 – сборник сгущенной пульпы; 10 – автоклав; 11 – вакуумный фильтр; 12 – сушилка; 13 – гипс на склад

Установка сероочистки (рис. 2.14) включает в себя отделения приготовления известняковой суспензии, абсорбции и приготовления гипса.

В отделении приготовления известняковой суспензии установлены: аппарат приготовления крепкого раствора известнякового молока, сборник известнякового раствора и мельница мокрого помола.

В отделении абсорбции смонтированы абсорберы 2 и 3 (внутренний диаметр 3 м, высота 12,6 м) с каплеуловителями, гидрозатворы, циркуляционные сборники 5 и 6 и циркуляционные насосы.

В отделении приготовления полуводного гипса установлены сгуститель 8, сборник сгущенной пульпы 9, репульпаторы, автоклав 10, вакуумфильтр 11, барабанная газовая сушилка 12, транспортная система, шаровая мельница, силос готовой продукции.

Дымовые газы от одного из котлов БКЗ-75-39Ф (станционные номера 5 и 6) объемом до $150\,000\text{ м}^3/\text{ч}$ очищаются от золы в мокрых золоуловителях, где их температура снижается до $75\text{ }^\circ\text{C}$. Газы подаются в абсорбционное отделение специальным дымососом и последовательно проходят две ступени очистки, промываясь суспензией известняка.

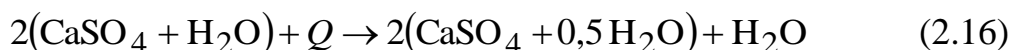
Суспензия из отделения приготовления поступает в циркуляционный сборник второго по ходу газа абсорбера и циркуляционным насосом подается на форсунки этого абсорбера.

Во втором по ходу газов абсорбере окислы серы дымовых газов, реагируя с известняком, превращаются в сульфит кальция и частично в сульфат кальция, а также непрореагировавший известняк через циркуляционные сборники подается в абсорбер первой ступени 2, где проходит реакция окисления сульфита в сульфат кальция за счет кислорода дымовых газов.

Из абсорбера первой ступени 2 суспензия, содержащая до 90 % сульфата кальция выводится в сгуститель 8 и далее в сборник сгущенной пульпы 9, из которого она поступает в репульпаторы, куда подается портландцемент (для связывания примесей и увеличения показателя водостойкости материала) и малеиновая кислота в качестве регулятора кристаллизации гипса. После репульпаторов сгущенная суспензия направляется в автоклав-реактор 10, где при температуре 127 ± 5 °С происходит перекристаллизация двухводного гипса в полуводный гипс ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5 \text{H}_2\text{O}$). Далее гипс проходит отжим на ленточном вакуум-фильтре 11, сушку в сушильном барабане 12 (до влажности не более 20 %) и размол в мельнице тонкого помола. Готовый гипс поступает на склад готовой продукции.

К достоинствам рассмотренного способа сероочистки следует отнести его высокую надежность и эффективность (из дымовых газов можно удалить до 98 % SO_2), а также получение в конечном результате высококачественного товарного гипса.

Из гипса получают алебастр $\text{CaSO}_4 + 0,5 \text{H}_2\text{O}$, который применяется в строительстве как вяжущее средство. Для этого его обжигают в печах при температуре 150–170 °С, где происходит следующая реакция:

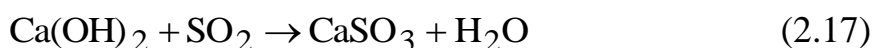


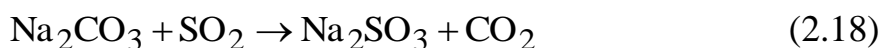
Обычно башенный абсорбер устанавливают за электрофильтром, обеспечивая тем самым высокую чистоту гипса.

Мокросухой способ очистки дымовых газов от SO_2

Способ основан на эффективном поглощении SO_2 известью $\text{Ca}(\text{OH})_2$ или содой Na_2CO_3 .

Способ называется мокросухим (МСС), когда в полый абсорбер, продуваемый дымовыми газами, впрыскивают суспензию, которая связывает диоксид серы, а жидкость суспензии за счет теплоты дымовых газов полностью испаряется. При этом имеют место реакции с образованием сульфитов кальция или натрия [8]:





Если абсорбер установлен перед золоулавливающей установкой, то продукты сероочистки сорбируются вместе с летучей золой и складываются на золоотвале.

Структурная схема мокросухого способа очистки дымовых труб от SO_2 представлена на рис. 2.15.

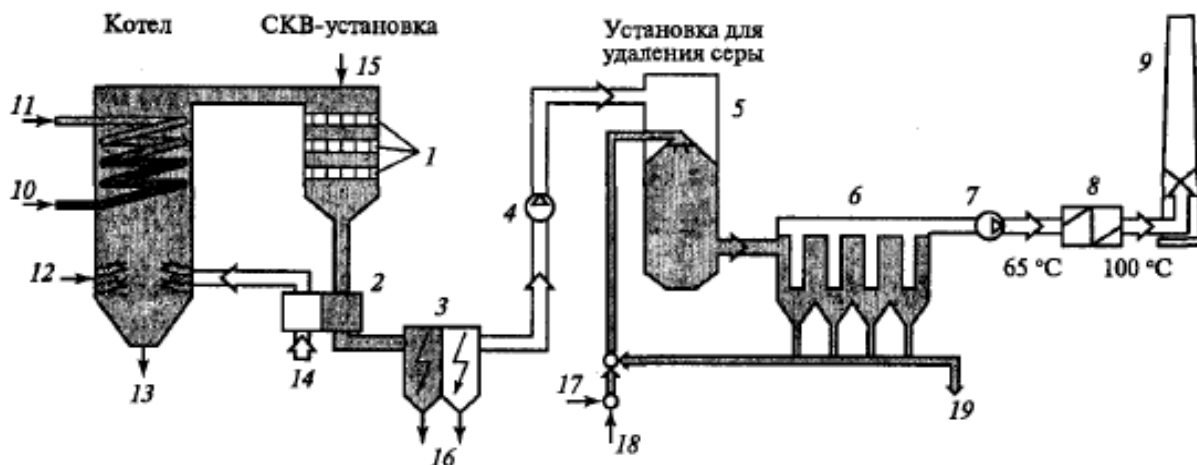


Рис. 2.15. Схема мокросухого способа очистки дымовых газов от SO_2 : 1 – катализатор; 2 – регенеративный воздухоподогреватель; 3 – электрофильтр; 4, 7 – дымососы; 5 – абсорбер; 6 – тканевый фильтр; 8 – подогреватель; 9 – дымовая труба; 10 – питательная вода; 11 – пар; 12 – угольная пыль; 13 – зола; 14 – воздух; 15 – впрыск аммиака; 16 – летучая зола; 17 – известь; 18 – вода; 19 – продукты реакции (сульфит и сульфат кальция)

К преимуществам МСС относятся:

- 1) простота технологической схемы;
- 2) меньшие, чем при МИС, капитальные затраты;
- 3) меньший расход тепловой энергии на подогрев дымовых газов по сравнению со схемой МИС;
- 4) отсутствие сточных вод.

Недостатками способа являются:

- 1) значительное энергопотребление (3–6 % мощности ТЭС);
- 2) повышенный расход дорогих реагентов (извести или соды);
- 3) низкое качество сухих отходов (отсутствие гипсовых вяжущих веществ);
- 4) необходимость установки системы очистки дымовых газов от твердых частиц (продуктов реакций) после абсорбера.

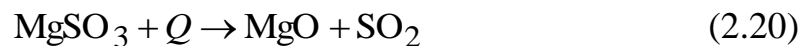
Из-за этих недостатков МСС получил ограниченное применение.

Магnezитовый способ очистки дымовых газов от SO

При очистке по магnezитовому способу дымовые газы поступают в абсорбер типа трубы Вентури, где орошаются суспензией, содержащей оксид магния. При этом происходит химическая реакция [8]:



Полученный твердый сульфит магния обезвоживается и подвергается термическому разложению при температуре 900 °С с образованием концентрированного сернистого ангидрида SO₂ и оксида магния:



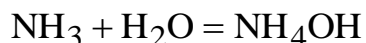
Концентрированный SO₂ используется для приготовления серной кислоты или элементарной серы, MgO используется повторно.

Достоинствами способа являются незначительный расход химических реагентов (только на восполнение потерь в технологическом цикле), получение высококачественных побочных продуктов: серной кислоты или элементарной серы. Недостатки способа – невысокая степень улавливания серы (до 90 %), и большой расход тепловой энергии на разложение сульфита магния. Способ не нашел широкого применения.

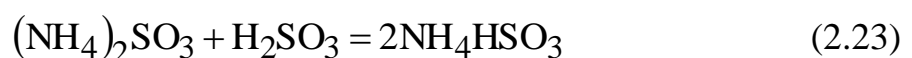
Аммиачно-сульфатный и аммиачно-циклический способы очистки дымовых газов от SO₂

Аммиачно-сульфатный способ (АСС) основан на связывании диоксида и триоксида серы водным раствором аммиака с последующим окислением образовавшихся продуктов взаимодействия веществ до стабильного сульфата аммония. Основными химическими реакциями в АСС являются [6,8]:

а) при абсорбции SO₂:



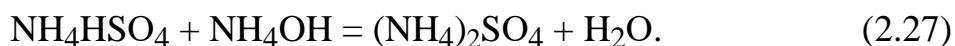
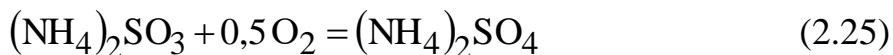
(при использовании водного раствора аммиака последняя реакция отпадает);



б) при абсорбции SO₃:

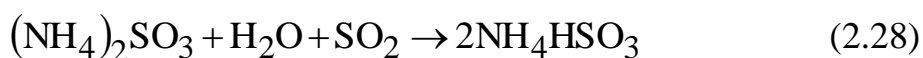


в) при окислении продуктов абсорбции:

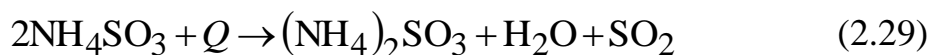


К числу основных преимуществ АСС следует отнести получение сульфата аммония, который служит удобрением в сельском хозяйстве.

Аммиачно-циклический способ (АЦС) очистки дымовых газов от SO_2 основан на поглощении SO_2 из дымовых газов распыленным раствором сульфита аммония $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$ с образованием бисульфита аммония по реакции:



После промывки газов раствор бисульфита аммония подвергают нагреву с образованием концентрированного сернистого ангидрида и сульфита аммония:



Сернистый ангидрид используется для получения кислоты или элементарной серы, а сульфит аммония $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$ используется повторно.

Достоинством способа является практическое отсутствие затрат реагентов и небольшой расход тепловой энергии на восстановление $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$.

К недостаткам следует отнести то, что все оборудование должно иметь кислотостойкое исполнение, кроме того, достаточно сложна эксплуатация установки. Данный способ находится в стадии освоения.

Удаление серы с помощью технологии WSA, разработанной фирмой «Хальдер Топсе АО»

Технология WSA (Wetgas Sulphuric Acid) разработана в середине 80-х гг. и применяется для обработки газов, содержащих SO_2 .

Технология включает в себя следующие процессы: охлаждение газа до заданной температуры в реакторе, конверсию SO_2 в SO_3 на поверхности катализатора, гидратацию SO_3 в H_2SO_4 и конденсацию паров последней в конденсаторе WSA.

Газ входит в реактор, который имеет один, два или более каталитических слоев в зависимости от содержания SO_2 и необходимой степени конверсии.

Так как реакция в реакторе экзотермическая, газ охлаждается между слоями для того, чтобы оптимизировать процесс конверсии SO_2 в SO_3 . После последней стадии конверсии газ охлаждается, что обеспечивает эффективное протекание реакции SO_3 с парами воды с образованием газообразной серной кислоты. Затем технологический газ поступает в конденсатор WSA [6, 8].

Конденсатор WSA представляет собой вертикально расположенный корпус с трубами, изготовленными из боросиликатного кислотоупорного термостойкого стекла. Технологический газ проходит по трубам, которые охлаждаются атмосферным воздухом. Серная кислота конденсируется в трубах и стекает вниз, ее концентрация увеличивается при смешивании с восходящим потоком горячего технологического газа. Серная кислота собирается в нижней части конденсатора, выложенной кирпичом, охлаждается приблизительно до $35\text{ }^\circ\text{C}$ в пластинчатом теплообменнике, а затем перекачивается в хранилище.

Технологический газ выходит из конденсатора при температуре примерно $100\text{ }^\circ\text{C}$. Его можно направлять непосредственно в дымовую трубу. Отличительной чертой конденсатора WSA является то, что газ, выходящий в трубу, содержит лишь незначительное количество паров серной кислоты.

Подогретый воздух выходит из конденсатора WSA при температуре около $200\text{ }^\circ\text{C}$. Часть этого воздуха используется для горения, а оставшаяся часть может быть выведена в дымовую трубу для увеличения подъемной силы газа или же использована для подогрева воды в котле.

Технология WSA обеспечивает удаление от 95 до 99 % SO_2 , который рекуперирован в концентрированную серную кислоту. Отличительные особенности технологии:

- 1) не используются химические реагенты;
- 2) отсутствуют сточные воды;
- 3) эффективная рекуперация технологической теплоты;
- 4) низкий расход воды для охлаждения.

Для очистки дымовых газов котлов ТЭС технология WSA может быть дополнена технологией селективного каталитического восстановления DENOX для очистки от оксидов азота. Такая комбинированная технология известна как технология SNOX.

Упрощенные малозатратные технологии сероочистки

Если содержание диоксида серы SO_2 в продуктах сгорания малосернистых углей близко к нормируемым значениям или если необходимо снизить выбросы оксидов серы только на 30–70 %, тогда для этой цели можно рекомендовать использование малозатратных технологий сероочистки [15].

К ним, во-первых, относится связывание серы путем ввода известняка в верхнюю часть топки. Этот способ именуется сухой известняковой технологией (СИТ), которая основана на обжиге тонко размолотого известняка в топочной камере при температуре 1 000–1 100 °С до образования извести с последующим ее взаимодействием с диоксидом серы. Основные химические реакции этой технологии:

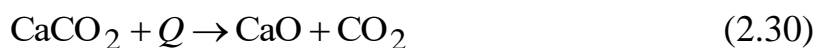


Схема установки сероочистки по СИТ представлена на рис. 2.16.

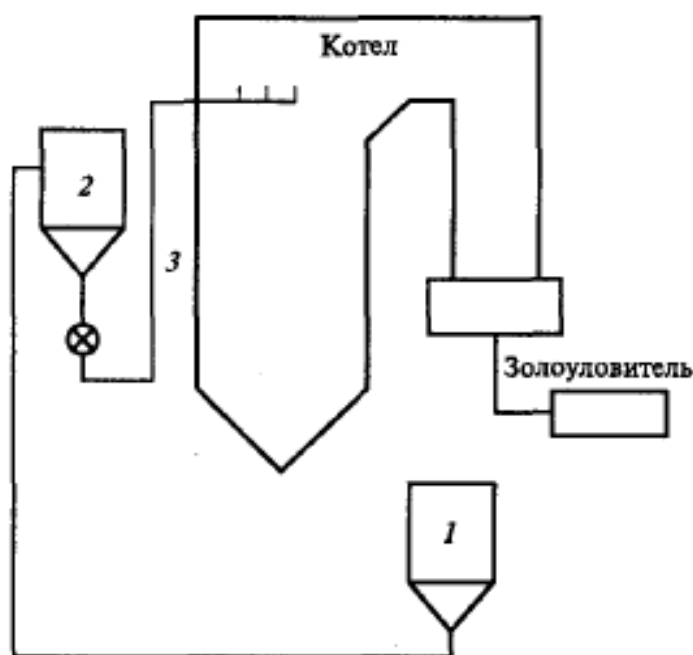


Рис. 2.16. Установки сероочистки по СИТ: 1 – силосная башня для хранения размолотого известняка; 2 – расходный бункер; 3 – система пневмотранспорта известняка в топку котла и его распределения в поперечном сечении топочной камеры

Установка работает следующим образом. Размолотый известняк из стационарной силосной башни подают в расходный бункер, а из него – в верхнюю часть топочной камеры, где имеется зона с температурой дымовых газов 1 000–1 100 °С. Частицы известняка при этой температуре разлагаются с образованием активной извести, которая взаимодействует с SO_2 при температуре газов около 850 °С.

При температуре газов приблизительно 500 °С связывание диоксида серы прекращается, и летучая смесь золы с отходами сероочистки уходит с дымовыми газами в золоуловитель. В результате реакции образуется безводный гипс (ангидрид).

Применение СИТ имеет ряд особенностей:

- 1) в ней можно использовать известняк любой степени кристаллизации;
- 2) ввод в дымовые газы известняка изменяет химический состав золы и снижает в результате этого температуру начала деформации золы, что может привести к увеличению шлакования поверхностей нагрева;
- 3) известь реагирует в первую очередь с триоксидом серы SO_2 , так что температура насыщения (сернокислотная точка росы) снижается; при больших количествах вводимого известняка точку росы можно снизить почти до точки росы водяного пара.

Уменьшение температуры точки росы сказывается на работе котельной установки двояко. Во-первых, это позволяет снизить температуру уходящих газов и тем самым частично компенсировать затраты на сероочистку. Во-вторых, электрофизические свойства дымовых газов ухудшаются, что особенно важно при использовании на котле электрофильтра, поскольку в этом аппарате появляется обратное коронирование различной степени интенсивности, во избежание чего необходимо принимать соответствующие меры.

Наличие в продуктах сгорания безводного гипса может привести к образованию в скрубберах-пылеуловителях трудно удаляемых отложений, поэтому необходимо обеспечивать точный химический баланс в золоуловителях.

Известны и другие малозатратные сухие технологии сероочистки с использованием извести, соды или поташа.

Подводя итоги, можно сделать следующие выводы;

- 1) наибольшую эффективность дает мокроизвестняковый способ, при котором степень сероочистки достигает 98 %;
- 2) наибольших капитальных затрат требует МИС сероочистки;
- 3) существующие технологии очистки дымовых газов от соединений серы позволяют осуществлять их очистку с высокой эффективностью.

2.3. Снижение выбросов оксидов азота в атмосферу

Наиболее опасными выбросами ТЭС являются оксиды азота, которые определяют токсичность продуктов сгорания угля и мазута на 40–50 %, а природного газа на 90–95 %. Оксиды азота также участвуют в образовании других вредных газов в атмосфере. Оксид и диоксид азота играют сложную

и важную роль в фотохимических процессах, происходящих в тропосфере и стратосфере при интенсивном солнечном свете и являющихся причиной образования фотохимического смога, высоких концентраций O_3 и формирования кислотных осадков¹.

Высокий уровень концентраций оксидов азота [8], которые опасны для человека, зависит от распределения выбросов, метеорологических условий (температуры, скорости и направления ветра, влажности воздуха, температурной инверсии, давления и пр.), от особенностей инфраструктуры.

В настоящее время принято считать, что оксиды азота при горении образуются в результате четырех основных механизмов, из которых первые три являются существенными для топок котлов (рис. 2.17): «термического» – по цепному механизму Зельдовича; «быстрого» – за счет активации молекулярного азота по реакциям с углеводородными радикалами, присутствующими в зоне реакции; «топливного» – за счет окисления присутствующих в топливе азотсодержащих соединений; четвертый механизм (образование через N_2O) имеет существенное значение при больших избытках воздуха (газовые турбины и т. п.) [16].

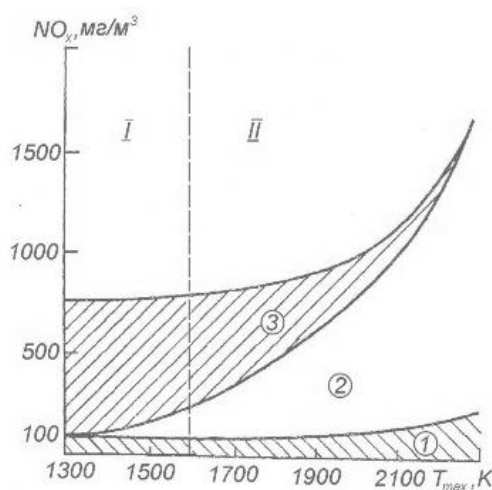


Рис. 2.17. Схема образования оксидов азота при сжигании различных видов топлива: I – бурый уголь и другое низкосортное топливо; II – каменный уголь, мазут и природный газ; 1 – «быстрые» (остаточные); 2 – «термические»; 3 – «топливные» NO_x

Термические оксиды азота возникают при высоких температурах и достаточном времени пребывания продуктов сгорания в зоне горения из молекулярного азота воздуха, подаваемого в топку котла.

¹Кислотные дожди представляют собой все виды метеорологических осадков, включая дождь, снег, град, туман, при которых наблюдается понижение pH осадков до 5,5 из-за загрязнений воздуха кислотными оксидами, как правило, оксидами серы и азота. Кислотные дожди являются причиной гибели любой растительности, способствуют разрушению объектов техносферы (зданий, памятников культуры, металлоконструкций и др.), понижают плодородие почв и могут приводить к выщелачиванию токсичных металлов из почвы и просачиванию их в водоносные грунтовые слои.

Итоговую реакцию можно записать в виде:



Экспериментальные исследования показали, что скорость образования NO намного меньше скорости горения и что основная часть NO образуется после завершения горения, когда повышение температуры приводит к диссоциации молекулярного кислорода. Скорость обратимых реакций образования и разложения NO в основном зависит от температуры в зоне горения и мгновенных концентраций избыточного кислорода, азота и оксида азота.

Из-за высокой энергии активации основное количество термических оксидов азота образуется в узком диапазоне температур, близком к максимальной температуре в зоне активного горения.

Скорость образования термических NO увеличивается с ростом температуры, она прямо пропорциональна концентрации азота и времени пребывания продуктов сгорания в зоне генерации оксидов азота, а также корню квадратному из концентрации кислорода. Поэтому первичные (режимно-технологические) мероприятия для снижения образования термических NO_x основаны на воздействии на один или несколько факторов в зоне максимальной генерации NO_x и на создании специальных условий в факеле горения, приводящих к восстановлению образовавшихся оксидов азота до молекулярного азота, как это, например, делается при ступенчатом сжигании топлива.

Образование топливных оксидов азота осуществляется в два этапа: сначала происходит газификация капель мазута или угольных частиц с выделением азотсодержащих соединений (радикалов R) типа CN, CHN, NH, NH_2 , а затем частичное окисление этих соединений по реакции:



Топливные оксиды азота образуются параллельно с горением топлива в основной зоне горения за промежуток времени меньший, чем время горения топлива. Из-за малой энергии активации процесс образования NO из азота топлива происходит уже при относительно низких температурах (1 000 °C). Зависимость выхода топливных оксидов азота от содержания молекулярного кислорода в зоне горения близка к квадратичной. Естественно, важным фактором здесь является содержание азота в топливе.

При сжигании мазута в энергетических котлах доля топливной составляющей оксидов азота относительно невелика, а при сжигании угольной пыли в топках с твердым шлакоудалением доля топливных оксидов азота, как правило, превышает 90 %.

«Быстрые» NO образуются в зоне фронта пламени углеводородных топлив в результате аномально быстрых реакций молекулярного азота с углеводородами, содержащимися в топливе [8]:



Эти реакции активно протекают уже при температуре около 1 300 °С, когда образование термических NO еще не происходит. Концентрация «быстрых» NO растет при увеличении избытка воздуха и температуры и при сжигании природного газа может составить 70–90 мг/м³. С этим приходится считаться при разработке мероприятий по подавлению образования NO_x в целях достижения современных норм по выбросу NO_x в атмосферу.

2.3.1. Первичные мероприятия, направленные на уменьшение выбросов NO_x

Методы снижения образования оксидов азота направлены на подавление «термических», а при необходимости также и «топливных» NO_x. К мероприятиям по уменьшению образования NO_x относят:

- снижение температуры горения;
- уменьшение времени пребывания продуктов сгорания в области высоких температур;
- создание зон реакций с восстановительной атмосферой (избыток воздуха меньше единицы), где образование NO из азота топлива затруднено и восстановление оксидов азота идет до молекулярного азота.

Для снижения выбросов оксидов азота на электростанциях проводят следующие первичные, или режимно-технологические, мероприятия [8]:

- 1) использование горелок с низким выбросом NO_x (снижение NO_x до 60 %);
- 2) ступенчатое сжигание топлива (снижение NO_x на 35–45 %);
- 3) ступенчатая подача воздуха (снижение NO_x до 50 %);
- 4) рециркуляция дымовых газов (снижение NO_x до 33 %);
- 5) впрыск воды (или водомазутной эмульсии) в ядро факела (снижение NO_x на 25–44%);
- 6) комбинация первичных мероприятий (снижение NO_x до 90 %).

Снижение образования «термических» NO_x достигается путем воздействия главным образом на максимальную температуру горения, что обеспечивается вводом газов рециркуляции, воды и пара в зону горения или в дутьевой

воздух, а также двух и трехступенчатым сжиганием топлива, снижающим максимальную температуру и содержание кислорода в зоне максимальных температур. Выход «топливных» NO_x в меньшей мере зависит от максимальной температуры, но сильно зависит от избытка воздуха, поэтому здесь более эффективным является ступенчатое горение.

При сжигании газа часто удается существенно уменьшить выход «термических» NO_x , приблизив их концентрации к уровню «быстрых» или к $100\text{--}120 \text{ мг/м}^3$ при холодном дутьевом воздухе и к $150\text{--}200 \text{ мг/м}^3$ при горячем воздухе.

2.3.1.1. Горелки с низким выбросом NO_x

У горелок с низким выбросом NO_x , которые созданы в многочисленных вариантах, организована ступенчатая подача воздуха. Принцип работы такой горелки (рис. 2.18) заключается в следующем. В ядро факела подается количество воздуха, недостаточное для обеспечения полноты горения (кислородный «голод»), в то время как во внешнюю зону горения подается избыточное количество воздуха, чтобы обеспечить полноту сгорания топлива. Кроме того, конструкция горелки позволяет поддерживать рециркуляцию воздуха внутри зоны горения.

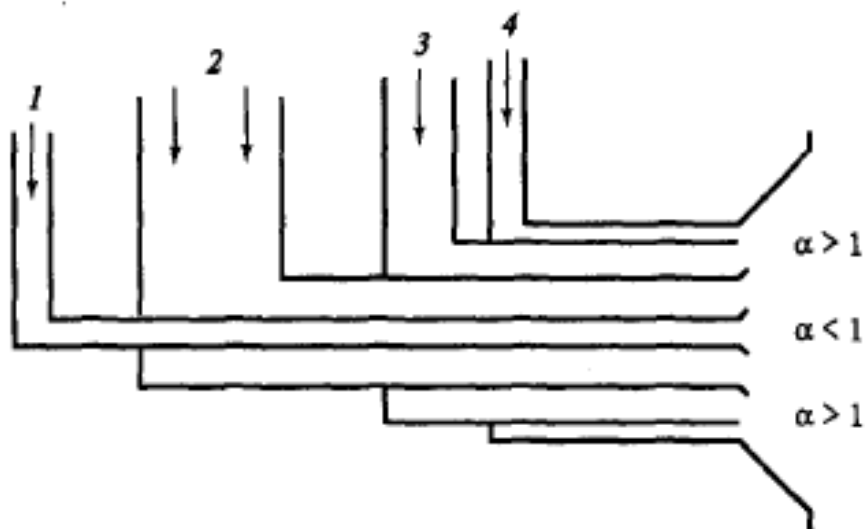


Рис. 2.18. Принципиальная схема пылеугольной горелки с низким выбросом NO_x : 1 – первичный воздух; 2 – пылевоздушная смесь; 3 – вторичный воздух; 4 – третичный воздух (α – избыток воздуха)

Применение этих горелок дает возможность, не ухудшая технико-экономические показатели котла, снизить выбросы оксидов азота до 50 % для угольных котлов и до 60 % для газомазутных котлов.

2.3.1.2. Ступенчатое сжигание топлива

При ступенчатом сжигании топлива горелки в топке котла размещают в несколько ярусов (обычно три-четыре яруса). Подача воздуха (избыток воздуха) изменяется тоже поярусно. Например, при двухступенчатом сжигании нижний ряд горелок получает недостаточное для стехиометрического горения количество воздуха, а верхние ряды горелок, наоборот, получают избыточное его количество [6, 8].

Наилучший эффект дает трехступенчатое сжигание, прежде всего, на котлах с топками с жидким шлакоудалением, и особенно сжигание высокосернистых топлив при обеспечении минимальной газовой коррозии экранных труб.

Суть трехступенчатого сжигания состоит в том, что по высоте топочной камеры организуют три зоны. В первой (нижней) зоне топки сжигается основное количество топлива (70–85 %) при избытке воздуха близком к единице. На выход из зоны активного горения подается оставшая часть топлива (15–30 %) и соответствующее количество воздуха с таким расчетом, чтобы суммарный избыток воздуха в ней составлял 0,9–0,95 (т. е. небольшой недостаток для полного сжигания топлива), благодаря чему в этой части топки создается зона с восстановительной средой, в которой продукты неполного горения (CO , H_2 , C_nH_m) восстанавливают уже образовавшиеся окислы азота NO до N_2 .

Выше этой зоны в верхней части топки организуется зона дожигания оставшихся продуктов неполного сгорания с участием третичного воздуха, подаваемого под повышенным давлением через специальные сопла (рис. 2.19).



Рис. 2.19. Принципиальная схема трехступенчатого сжигания топлива в топке котла (α – избыток воздуха)

Уменьшение выбросов оксидов азота при ступенчатом сжигании топлива в среднем составляет: при сжигании угля – до 40 %, при сжигании мазута – до 35 %, при сжигании природного газа – до 45 %. Использование ступенчатого сжигания топлива в топке котла приводит к снижению технико-экономических показателей котла. Увеличивается избыток воздуха на выходе из топочной камеры, и при этом возрастает температура газов на выходе из топки в среднем на 4–5 °С, а КПД котла снижается на 0,2–0,5 %. Кроме того, несколько увеличивается расход электроэнергии на собственные нужды, что приводит к дополнительному снижению КПД котла нетто на 0,1–0,8 %.

2.3.1.3. Рециркуляция дымовых газов

Рециркуляция дымовых газов из конвективной шахты в тракт воздуха осуществляется, как правило, с помощью дополнительного дымососа рециркуляции газов (ДРГ) (рис. 2.20).

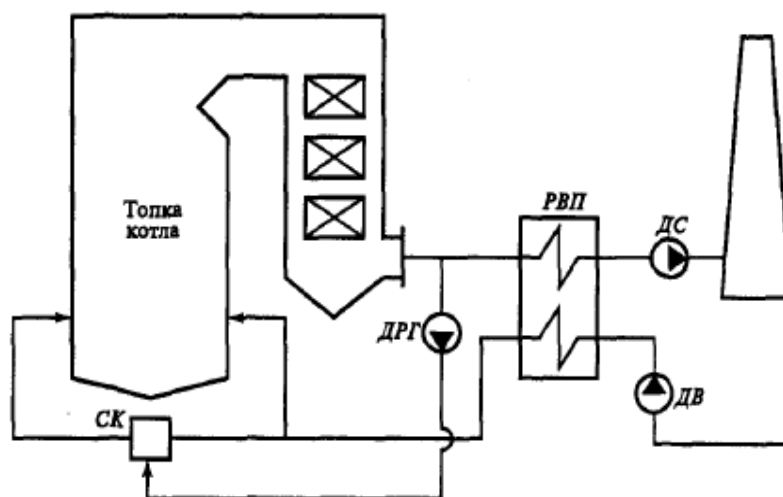


Рис. 2.20. Принципиальная схема рециркуляции дымовых газов котла с использованием дымососов рециркуляции газов: ДВ – дутьевой вентилятор; ДС – дымосос; РВП – регенеративный воздухоподогреватель; СК – смесительная камера

Для улучшения перемешивания газов рециркуляции с воздухом, который поступает в топочную камеру, устанавливают смесители. Доля рециркулирующих газов обычно не превышает 20 %. Благодаря рециркуляции дымовых газов снижаются концентрация кислорода в зоне горения топлива и температура горения [6, 8].

Уменьшение выбросов NO при использовании данного метода может быть доведено: при сжигании угля до 25 %, при сжигании мазута до 30 %, при сжигании природного газа до 33 %.

Технико-экономические показатели ТЭС при этом заметно ухудшаются. Возрастает расход электроэнергии на собственные нужды (за счет привода дымососов рециркуляции газов). Кроме того, растет температура уходящих газов, что приводит к снижению КПД котла на 0,6–1,3 %.

Иногда рециркуляцию дымовых газов осуществляют на всасе дутьевых вентиляторов, если при этом имеется достаточный запас их производительности. Доля рециркуляции при этом обычно не превышает 10 %. В этом случае также возрастает температура уходящих газов и снижается КПД котла, возрастают затраты электроэнергии на собственные нужды из-за роста расхода электроэнергии на дутьевые вентиляторы.

2.3.1.4. Впрыск воды или водомазутной эмульсии в ядро факела

Впрыск воды или ввод водомазутной эмульсии в ядро факела снижает максимальную температуру в нем и тем самым препятствует образованию термических оксидов азота. Этот способ применяется по большей части в период неблагоприятных метеорологических условий в районах с повышенной фоновой концентрацией вредных веществ. Количество впрыскиваемой в топку котла воды составляет около 10 % расхода топлива.

Этот способ снижает выбросы NO примерно на 25 % и одновременно снижает КПД котла приблизительно на 0,7 %. Эффективность впрыска воды в топку существенно уменьшается, если котел работает с рециркуляцией газов или в режиме ступенчатого сжигания топлива. По этой причине метод впрыска не получил широкого применения.

Выполненные исследования, результаты которых широко опубликованы, показывают, что для теплоэнергетики одной из технологий, направленных на защиту атмосферного воздуха и водного бассейна от выбросов различных ингредиентов (NO_x , CO, сажи, многоядерных углеводородов, нефтепродуктов и других вредных веществ), является сжигание мазута в виде водомазутной эмульсии, а также природного газа с применением впрыска в топку сбросных вод [8].

Метод сжигания водомазутной эмульсии широко известен. В ходе исследований, посвященных этому вопросу, установлено, что для достижения поставленной задачи водомазутная эмульсия должна представлять собой однородную смесь мазута и добавляемой влаги по типу «вода – масло», в которой вода как дисперсная фаза в виде частиц диаметром несколько микрометров находится внутри топливной оболочки. Только при соблюдении этого условия и влажности водомазутной эмульсии до 20 % обеспечиваются надежное воспламенение и устойчивое ее горение с высокой полнотой сгорания. Повышенная эффективность процесса горения эмульсии

(даже при предельно низком избытке воздуха) обусловлена микровзрывом ее капле из-за различия температур кипения воды и мазута. При дополнительном дроблении капле эмульсии достигается ускорение их испарения и улучшается процесс перемешивания топлива с воздухом, в результате чего благодаря наличию в зоне горения продуктов диссоциации воды процесс сгорания мазута существенно интенсифицируется. Для приготовления кондиционных водомазутных эмульсий требуемых влажности, дисперсности, вязкости необходимо применять соответствующие устройства – эмульгаторы.

Использование в качестве добавочной воды сточных вод дает возможность подвергнуть огневому обезвреживанию их значительную часть (сточные воды могут составлять до 20 % расхода топлива на котел). Это позволяет перевести ТЭС или котельную на малоотходную технологию (по крайней мере, путем утилизации всех сточных вод, загрязненных нефтепродуктами).

Сжигание водомазутной эмульсии приводит к снижению уровня температур в зоне максимальной генерации оксидов азота и, следовательно, к значительному (25–44 %) снижению их концентрации в дымовых газах. Более глубокого подавления NO_x , можно достичь в том случае, если в качестве добавочной влаги вместе со сточными водами использовать растворы азотсодержащих веществ при соответствующей организации процесса сжигания топлива.

Фирма ИНТРЭК (Россия) разработала и реализовала на ряде ТЭО ОАО «Мосэнерго» технологию снижения количества вредных газообразных выбросов и полной утилизации вод, загрязненных мазутом [17].

В результате испытаний на отдельных котельных были сделаны следующие выводы:

1) исчезает проблема замазученных вод, поскольку именно эту воду эмульгируют в первую очередь, а приготовленная водомазутная эмульсия не расслаивается в процессе хранения в баках;

2) повышается надежность топливоотдачи, так как отсутствуют водяные пробки в мазутопроводах;

3) облегчается переход от сжигания газа на сжигание мазута;

4) выбросы NO_x , снижаются на 25–44 % в зависимости от конкретных производственных условий;

5) снижается выброс CO при работе с теми же коэффициентами избытка воздуха, что и при сжигании неэмульгированного мазута, или снижается коэффициент избытка воздуха при одинаковых значениях концентрации CO .

Разработанная технология, с одной стороны, позволит полностью утилизировать все сточные воды, загрязненные нефтепродуктами, а с другой стороны, улучшить состав газообразных выбросов.

2.3.1.5. Применение комбинаций первичных мероприятий

Для достижения нормы выбросов NO , при сжигании топлив в топках котлов, как правило, применяют комбинации первичных методов. На газомазутных котлах чаще всего используют следующие комбинации первичных мероприятий [6, 8, 15]:

- 1) сочетание ступенчатого сжигания топлив с рециркуляцией дымовых газов;
- 2) установку полуподовых горелок в сочетании со ступенчатым сжиганием и с рециркуляцией дымовых газов и др.

В настоящее время для снижения выбросов NO_x при сжигании твердого топлива используются комбинации следующих первичных мероприятий: использование специальных горелок, ступенчатая подача воздуха и топлива, рециркуляция дымовых газов, предварительный подогрев угольной пыли, подача пыли высокой концентрации и др.

Из анализа приведенных выше данных можно сделать следующие выводы:

- 1) на котлах, в которых сжигается газ, можно при использовании первичных мероприятий получить концентрации оксидов азота, приближающиеся к требуемым для экологически безопасных ТЭС ($150\text{--}200 \text{ мг/м}^3$);
- 2) на котлах, в которых сжигаются мазут и твердое топливо, для получения экологически безопасных показателей выбросов NO_x , необходимо использование вторичных мероприятий.

В дополнение к материалу, посвященному первичным мероприятиям по уменьшению выбросов NO , из топок котлов, следует отметить, что при использовании малозатратных методов подавления NO_x , при сжигании природного газа в случае неполного сгорания топлива могут образовываться угарный газ CO , углеводороды CH_4 , C_2H_6 , а также канцерогенные вещества. Продукты неполного сгорания топлива весьма вредны. По своей распространенности и интенсивности воздействия из многих химических веществ этого типа наибольшее значение имеют полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) и наиболее активный из них бенз(а)пирен $\text{C}_{20}\text{H}_{12}$. Максимальное количество бенз(а)пирена образуется в топках при температуре $700\text{--}800 \text{ }^\circ\text{C}$ в условиях нехватки воздуха для сгорания топлива.

При камерном сжигании пылевидного топлива содержание этого соединения в дымовых газах обычно не превышает $4,2 \text{ мкг}/100 \text{ м}^3$. Примерно в такой же концентрации содержатся канцерогены в выбросах котлов, работающих на мазуте и газовом топливе. Однако при неправильном ведении процесса горения или при несовершенной конструкции топки количество выбрасываемого бенз(а)пирена может значительно увеличиться: в 50 раз при работе на мазуте и в 10 раз при работе на газе.

Одной из особенностей низкотемпературного окисления топлива является возможное появление диоксинов. Необходимо учитывать чрезвычайную стойкость диоксинов. Каким бы малым ни был выброс диоксинов, они на десятилетия остаются в окружающей среде.

Таким образом, главным средством борьбы с загрязнением атмосферы канцерогенными углеводородами является обеспечение максимальной полноты сгорания топлива.

2.3.2. Вторичные мероприятия по уменьшению выбросов NO_x

2.3.2.1. Сравнительный анализ различных методов очистки дымовых газов от NO_x

С целью снижения содержания оксидов азота в отходящих дымовых газах применяют следующие методы [8]:

- для крупных энергогенераций мощностью более 400 МВт – селективное каталитическое восстановление (СКВ), где в качестве восстановителя выступает аммиак;
- для небольших и средних энергогенераций (мощность менее 300 МВт) – селективное некаталитическое восстановление (СНКВ);
- гибридный метод – технологический процесс, который представляет собой комбинацию СНКВ с облегченной версией СКВ.

Основой вторичной обработки технологий СКВ, является пропускание дымовых газов через специализированный комплекс (реактор), содержащий катализатор (пористые пластины из активных соединений различных металлов), который стимулирует химическое преобразование оксидов азота, не принимая участия в самой реакции. Дымовые газы попадают в реактор и насыщаются смесью аммиака и воздуха. Жидкий аммиак берется из хранилища, испаряется и впрыскивается в реактор. На данном процессе аммиачный газ действует как восстановитель; азот вытесняется водородом. В результате возникает молекулярный азот N_2 и вода H_2O .

Нужно отметить, что технологический процесс СКВ является надежным, но весьма дорогостоящим техническим решением, обеспечивающим степень уменьшения содержания окислов азота более 85–90 %. Однако, катализатор ограничивает эксплуатационные показатели котлоагрегата, в котором используется техпроцесс СКВ. Поэтому перед тем, как реализовывать решение, в котором используется технологический процесс СКВ, необходимо принять во внимание следующие ограничения:

1) поры и каналы дорогостоящего катализатора может заблокировать пыль и прочие выбросы, что приведет к снижению активности катализатора либо абразивному износу катализатора;

2) при выходе температуры за пределы допустимого диапазона активность катализатора в значительной степени изменяется: при слишком низкой температуре активность катализатора снижается, а при слишком высокой – происходят нежелательные вторичные реакции.

Следует также отметить существенные размеры систем СКВ, зачастую ограничивающие применение данного метода.

Процессы СНКВ снижения выбросов соединений азота также используются в качестве самостоятельного решения или в связке с так называемыми «первичными методами» для снижения уровня выбросов соединений азота в дымовых газах.

Суть технологии заключается в следующем: в дымовой газ вводится реагент, преобразующий соединение азота в чистый, безвредный азот N_2 и воду. Реагент распределяется в объеме топочного газа в виде водного раствора. Мелкодисперсные капли нейтрализующего NO_x реагента строго контролируемо вводятся в топочную камеру при помощи различных инжекторных систем, а затем равномерно распределяются в поперечном сечении зоны реакции в правильном температурном диапазоне.

В качестве реагента в комплексах СНКВ могут выступать различные соединения: аммиачная вода, специализированные растворы мочевины – водные растворы мочевины с добавлением присадок.

При постановке задачи по снижению уровня NO_x для выбора реагента комплекса СНКВ необходимо учитывать ряд параметров: общий дизайн комплекса, уровень необходимого снижения выбросов, наличия фильтров и/или очистительных комплексов дымовых газов, типа и качества топлива и т. п. Выбор реагента также оказывает влияние на операционные затраты на функционирование комплекса.

Нужно отметить, что использование техпроцесса СНКВ в теплоэнергетических установках дает особенные преимущества при небольших или средних размерах котлоагрегатов и умеренных требованиях по степени

восстановления окислов азота. Если требуемый уровень снижения выбросов оксида азота превышает предельные значения эксплуатационных показателей, которые обеспечиваются при использовании в теплоэнергетическом агрегате техпроцесса СНКВ, следует выбирать техническое решение с использованием катализатора: технологический процесс СКВ или комбинированный техпроцесс. Несмотря на то, что это приводит к увеличению первоначальных капиталовложений и затрат на техническое обслуживание, для агрегатов с более высокими требованиями по снижению выбросов оксида азота эти дополнительные затраты покрываются за счет меньшего потребления материала в процессе эксплуатации.

Использование в теплоэнергетическом агрегате техпроцесса СНКВ в пределах диапазона эксплуатационных параметров обеспечивает более высокие результаты, чем использование техпроцесса СКВ. Это объясняется следующим причинами: большой экономией затрат, более высокой общей энергетической эффективностью, большей пригодностью для технического обслуживания, большим сроком службы.

Таким образом, для определения наиболее подходящего из описанных технологических процессов, решающее значение имеют не только финансовые показатели затрат, но и следующие технические факторы:

- 1) отношение первоначального уровня выбросов к требуемому значению;
- 2) энергетический баланс технологии;
- 3) конструкция и размер котлоагрегата;
- 4) свойства топлива.

Подводя итоги, можно утверждать, что системы СКВ и СНКВ на крупных угольных энергоблоках применяются достаточно часто. По мере ужесточения нормативов выбросов NO_x и снижения стоимости подобных систем последние могут оказаться конкурентоспособными по сравнению с реконструкцией системы горения в целях снижения образования NO_x .

По сравнению с СКВ для системы СНКВ не нужны значительные инвестиционные затраты, она проще, однако эффективность этой системы очистки заметно ниже (40–60 %). При практической реализации системы СНКВ невозможно обеспечить оптимальную температуру дымовых газов по всему сечению газохода; предотвратить изменение температуры в реакционной зоне при изменении нагрузки котла; распределить аммиак по сечению газохода так, чтобы везде соотношение NH_3/NO_x было близко к оптимальному; недостаточна протяженность реакционной зоны для обеспечения необходимого времени протекания реакции.

Таким образом, при необходимости с помощью СНКВ можно снизить выбросы NO_x по сравнению с первоначальными вдвое, а с помощью селективного каталитического восстановления (СКВ) в 5–10 раз.

2.3.2.2. Селективный каталитический восстановительный метод очистки дымовых газов от NO_x

Система каталитического восстановления NO_x является наиболее эффективной и освоенной для уменьшения содержания оксидов азота в дымовых газах мощных паровых котлов. За рубежом она получила название технологии De NO_x (de-nitrification process)¹.

Каталитические методы дают возможность [15]:

- перерабатывать многокомпонентные газы с малыми концентрациями вредных примесей;
- добиваться высоких степеней очистки;
- вести процесс непрерывно;
- избегать в большинстве случаев образования вторичных загрязнителей;
- переводить экологически опасные примеси в безвредные или даже полезные.

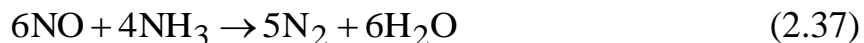
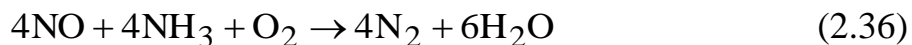
Недостатки каталитических методов связаны с проблемами поиска, приготовления дешевых катализаторов и обеспечения их длительной эксплуатации.

Система каталитического восстановления основана на том, что вводимый в поток газов химический реагент взаимодействует преимущественно с NO_x . Хорошей избирательностью (селективностью) для уменьшения содержания NO_x в уходящих газах обладает аммиак NH_3 . Аммиак (аммиачная вода, карбамид) вводится в высокотемпературную (900–1 100 °С) область газотока котла с газами рециркуляции, воздухом или паром. Сочетание технологических методов подавления оксидов азота с методом СНКВ при сжигании угля позволяет снизить концентрации оксидов азота в дымовых газах до 300 мг/м³.

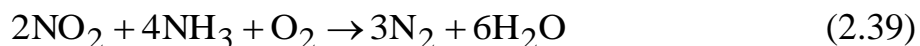
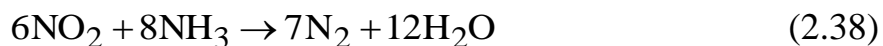
Однако химические реакции аммиака с NO и NO_2 эффективно протекают только при весьма высокой температуре (900–1 000 °С).

¹Одним из эффективных и проверенных методов очистки дымовых газов от NO_x является селективное каталитическое восстановление NO аммиаком на оксидных ванадий-титановых катализаторах. Данная система обеспечивает удаление 67 % исходного содержания NO_x с проскоком аммиака менее 5 ррт. Впрыск аммиака осуществляется через сопло в газоток. Для хорошего распределения потока за входным каналом размещены направляющие лопасти. Катализатор загружен в два слоя. Спроектированная система не имеет возможности байпасирования реактора. Предварительный обогрев катализатора осуществляется горячим воздухом. Катализатор производится на волокнисто-керамическом носителе TiO_2 , который пропитывается оксидами ванадия V_2O_5 , и вольфрама WO_3 . Указанные компоненты равномерно распределены по поверхности катализатора.

Для снижения температуры используют катализаторы. Реакции с монооксидом азота NO происходят на внешней поверхности катализаторов и имеют вид:

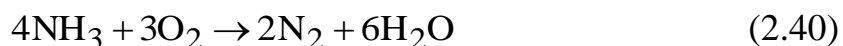


Присутствующий в уходящих газах котла диоксид азота NO₂, содержание которого не превышает 5 %, вступает с аммиаком в несколько иные реакции:



Помимо этих реакций на катализаторе возможны и нежелательные реакции [8, 16]:

- расход аммиака увеличивается:



- конверсия SO₂ в SO₃:



К катализаторам предъявляются следующие требования:

- 1) высокая активность восстановления NO в N₂ в широком диапазоне температур;
- 2) высокая избирательность (селективность) по NO_x;
- 3) низкая активность реакций с оксидами серы;
- 4) устойчивость против истирания твердыми частицами и отравления катализатора;
- 5) длительный ресурс.

Этим требованиям отвечают следующие материалы:

- 1) оксиды титана, алюминия или кремния в пористом виде;
- 2) смеси оксидов ванадия, молибдена, вольфрама, а также ряда других металлов.

Установки, реализующие метод СКВ (СКВ-установки), имеют максимальную эффективность в интервале температур газов 340–380 °С. При температурах дымовых газов ниже 340 °С увеличивается интенсивность нежелательных реакций (например, NH₃ с O₂). При температуре 450 °С и выше возникает опасность значительного снижения эффективности работы катализатора.

Теоретически имеется возможность дальнейшего повышения эффективности СКВ-установки, но для этого необходимо увеличивать избыток аммиака. При этом возникает опасность его нежелательного проскока и повышения концентрации NH_3 за катализатором и в уходящих газах.

У катализатора имеются три взаимно связанные характеристики:

- 1) степень очистки газов R_{NO_x} (снижение концентрации NO_x в дымовых газах);
- 2) проскок NH_3 (количество аммиака на выходе из установки);
- 3) объем катализатора.

Одинаковой степени очистки дымовых газов от NO_x можно добиться, используя катализатор большого объема при небольшом проскоке аммиака NH_3 и катализатор малого объема при большом проскоке аммиака.

При степени очистки газов 80–85 % имеется почти линейная зависимость между проскоком аммиака и объемом катализатора.

Основным элементом СКВ-установки служит каталитический реактор, устройство которого показано на рис. 2.21. Он состоит из отдельных керамических элементов ячеистой структуры, которые собирают в модули и устанавливают в газоходе котла в несколько слоев [17].

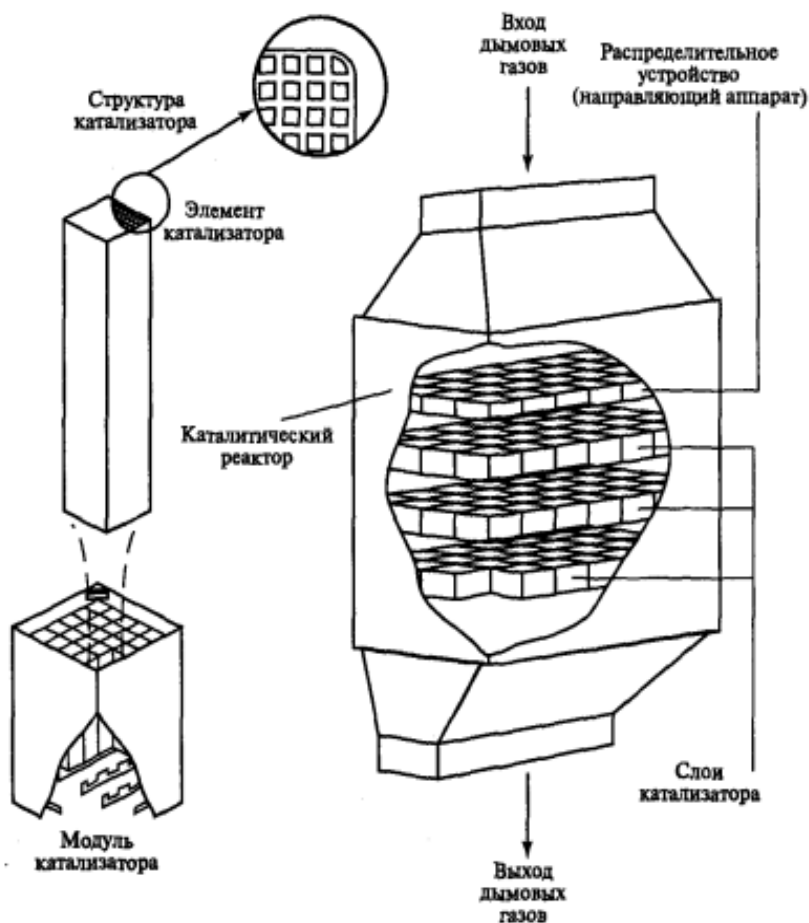


Рис. 2.21. Устройство каталитического реактора

Из рисунка видно, что при прохождении дымовых газов через трехслойный каталитический реактор наиболее «нагруженным» является первый слой реактора, на который приходится основная масса восстановления NO_x .

С течением времени эффективность работы катализатора падает, и поддерживать первоначальную эффективность работы катализатора становится возможно только путем увеличения проскока аммиака. Сохранение постоянного проскока аммиака приводит к снижению эффективности катализатора по восстановлению NO_x в N_2 .

Начальная активность (способность к восстановлению NO_x) всех слоев катализатора одинакова. Дальнейшее изменение активности зависит от положения слоя катализатора (различие обусловлено разной концентрацией аммиака и оксидов азота): первый слой теряет свою активность («срабатывается», снижается его эффективность, растет проскок аммиака) во много раз быстрее, чем последующие, потому что на него приходится основная масса восстановления NO_x , поэтому его заменяют в первую очередь¹ (примерно через два года эксплуатации). Второй слой «срабатывается» примерно через три-четыре года, и так же осуществляется его замена. Замена третьего слоя в результате снижения его активности до предельных значений осуществляется через четыре с половиной года.

Очень важен выбор оптимальной схемы включения СКВ-установки в газовый тракт котла. Возможны два варианта схемы включения:

1. СКВ-установка включается в газовый тракт котла перед воздухоподогревателем (за водяным экономайзером), т. е. в зону, где температура газов около $350\text{ }^\circ\text{C}$. Такую установку можно назвать «горячей» СКВ-установкой.

2. СКВ-установка включается после электрофилтра и сероочистки («холодная» СКВ-установка).

Каждая схема включения имеет как преимущества, так и недостатки. Оптимальную схему включения следует выбирать с учетом результатов технико-экономического расчета.

Схема включения «горячей» СКВ-установки приведена на рис. 2.22.

Ее достоинством является то обстоятельство, что дымовые газы на входе в каталитический реактор имеют температуру, оптимальную для эффективного восстановления NO_x в N_2 . Таким образом, дополнительный подогрев дымовых газов перед реактором не требуется. Однако здесь могут возникнуть трудности компоновки поверхностей нагрева котла совместно с реактором (для действующей установки).

¹Гарантийное время работы катализатора определяется сохранением предельного содержания NO_x на выходе из реактора при минимальном проскоке NH_3 .

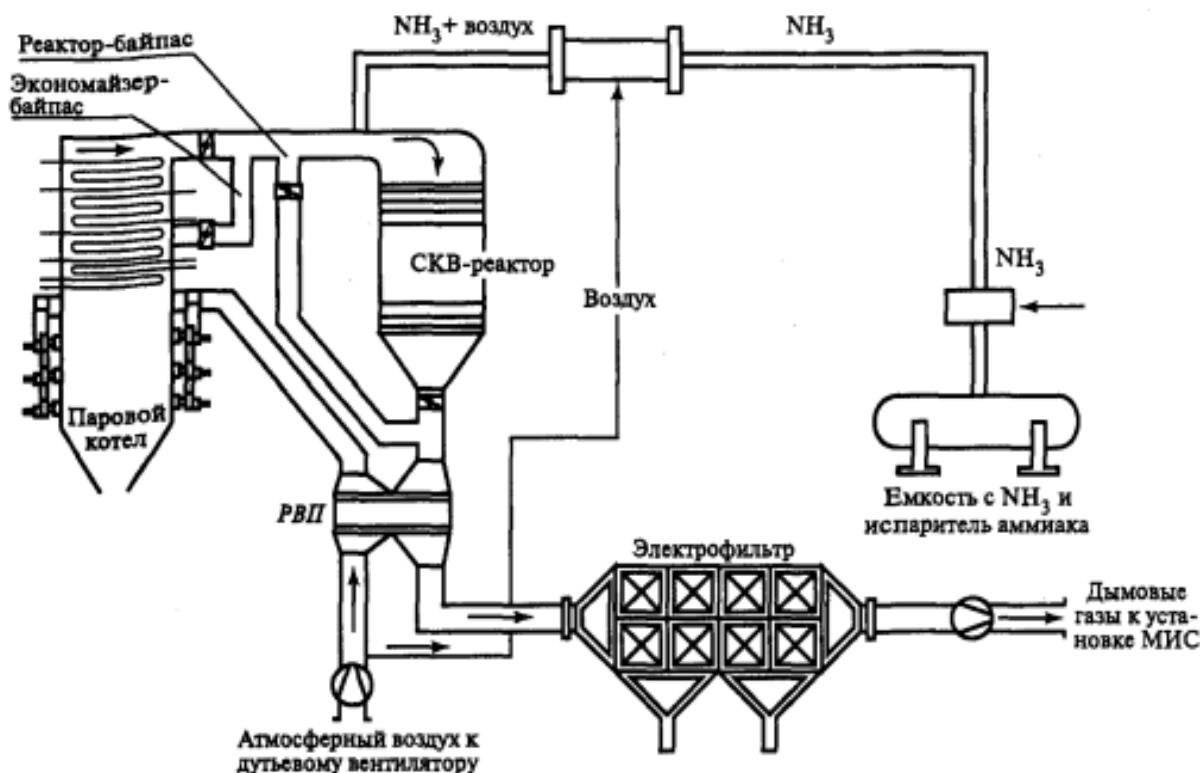


Рис. 2.22. Схема «горячей» СКВ-установки

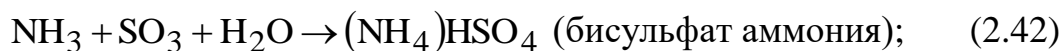
Кроме того, при пусках котла после ночного простоя возникают некоторые ограничения по времени включения реактора в работу, связанные с температурой дымовых газов за водяным экономайзером.

Для быстреего обеспечения оптимальных температурных условий эксплуатации «горячей» СКВ-установки в пускоостановочных режимах работы котла необходимы два байпаса (рис. 2.22): байпас экономайзера (экобайпас) и байпас реактора (реактор-байпас).

Используя экобайпас, можно быстро поднять температуру дымовых газов перед реактором на необходимый уровень при пуске котла. Кроме того, существует возможность повышения температуры газов перед реактором до требуемого уровня при частичной нагрузке котла.

При кратковременных остановках котла температуру в реакторе можно поддерживать с помощью специальной тепловой изоляции. Если температура дымовых газов за водяным экономайзером при пусках и остановках котла ниже, чем температура в катализаторе, с помощью реактора-байпаса можно пропускать газы в обход реактора, чтобы исключить захлаживание катализатора. Если температура перед экономайзером выше 350 °С, а за экономайзером ниже, то с помощью экобайпаса температуру перед реактором можно поддерживать не ниже 350 °С. При использовании байпасов время до включения СКВ-установки в работу и подачи аммиака можно сократить до 4 ч. При пуске СКВ-установки без реактора-байпаса с экобайпасом это время составляет 5,8 ч, без байпасов – 11,4 ч.

Другая проблема, связанная с эксплуатацией «горячей» СКВ-установки, заключается в конверсии (переходе) SO_2 в SO_3 , которая происходит на поверхности катализатора. При наличии аммиака протекают следующие химические реакции с участием SO_3 :



Образующиеся сульфат и бисульфат аммония в твердом виде способны забивать регенеративный воздухоподогреватель (РВП), в связи с чем требуется увеличивать число его промывок. При этом возрастает объем сточных вод и снижается число часов использования установленной мощности блока.

По этой причине и из-за невозможности смонтировать на «горячей» стороне действующего котла СКВ-установку и была разработана схема «холодной» СКВ-установки.

На рис. 2.23 изображена схема «холодной» СКВ-установки [8].

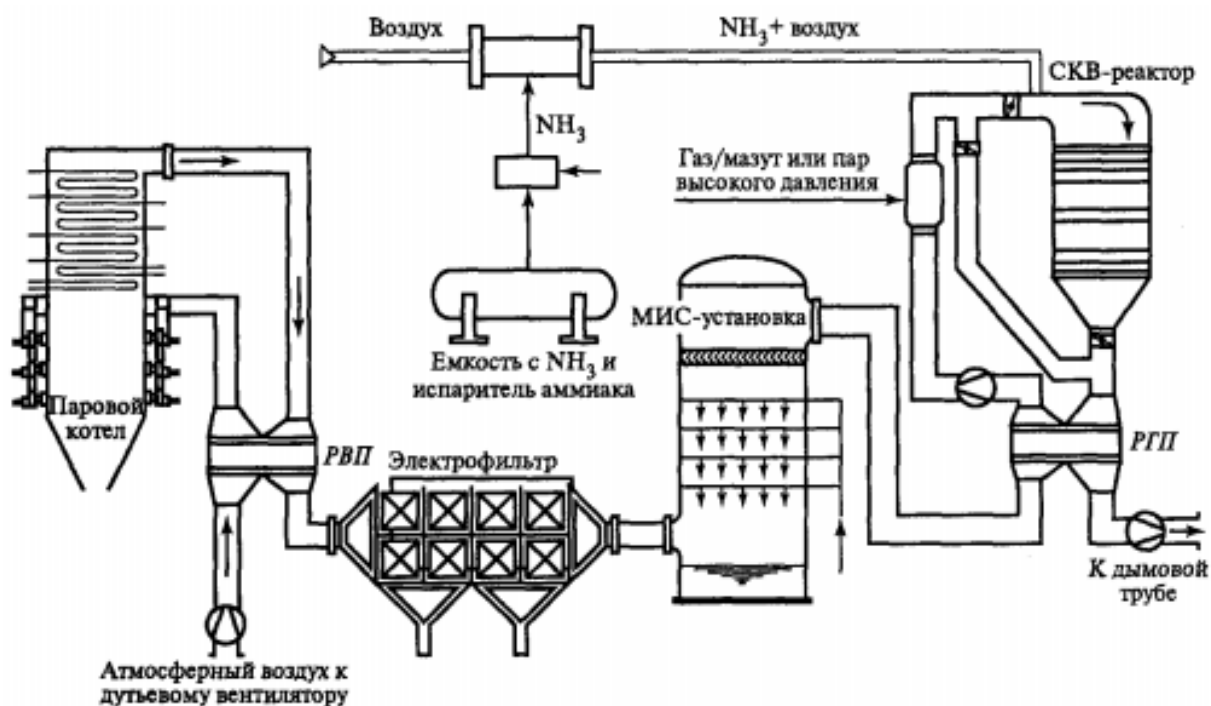


Рис. 2.23. Схема «холодной» СКВ-установки

Поскольку для эффективной работы реактора требуется температура дымовых газов около $350\text{ }^\circ\text{C}$, уходящие газы перед реактором следует подогревать. Так как регенеративного подогрева газа в этом случае недостаточно, приходится использовать дополнительный подогрев – сжигание мазута или природного газа или обеспечивать подогрев в теплообменнике паром при повышенных параметрах.

Кроме того, из-за наличия регенеративного газового подогревателя (РГП) и протечек неочищенного газа в канал очищенного для «холодной» СКВ-установки нужен большой объем катализатора, чем для «горячей» СКВ-установки, если использовать в обоих случаях одинаковый тип катализаторов с одинаковыми ячейками.

Меньшее содержание SO_2 в уходящих газах после сероочистки при работе «холодной» СКВ-установки уменьшает опасность конверсии SO_2 в SO_3 и забивания РГП твердыми сульфатом и бисульфатом аммония. Кроме того, появляется возможность активнее использовать материал катализатора. Меньшее содержание пыли после электрофилтра и после сероочистки делает возможным применение ячеек с меньшими размерами. Оба фактора ведут к уменьшению объема катализатора.

При использовании «холодной» СКВ-установки сокращается время для включения в работу реактора и упрощаются возможности размещения установки. Последнее обстоятельство зачастую оказывается решающим при сооружении «холодной» СКВ-установки на действующем оборудовании.

Вместе с тем применение СКВ-установки может привести к возникновению других проблем. Одна из них связана с проскоком аммиака (при стационарном режиме работы энергоблока составляет около 5 ррт). Распределение этого проскока по частям газохода, расположенным за реактором «горячей» СКВ-установки, представлено на рис. 2.24.

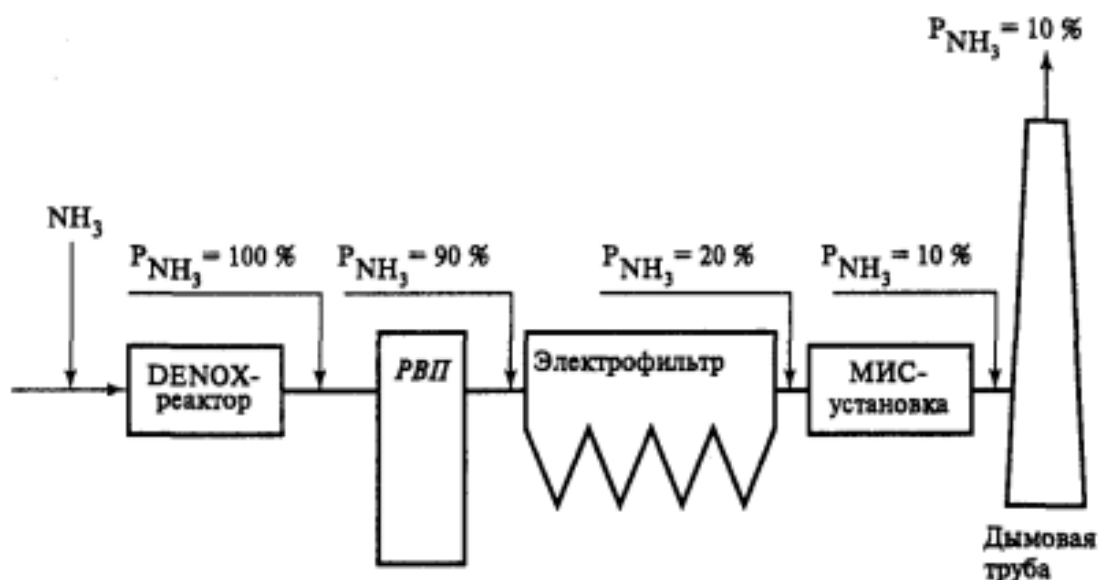


Рис. 2.24. Распределение проскока аммиака по частям газохода

Примерно 10 % аммиака превращается за реактором в бисульфат и сульфат аммония и откладывается на поверхности нагрева РВП. Большая часть (около 70 %) проскока аммиака связывается летучей золой в электрофилтре и удаляется вместе с уловленной золой. Если далее расположена

сероочистка с получением товарного гипса, тогда 10 % аммиака может быть связано как в гипсе, так и в сточных водах сероочистки. Кроме того, около 10 % избыточного аммиака выбрасывается из дымовой трубы в атмосферу. Концентрация NH_3 в очищенных дымовых газах может составлять примерно 0,6–0,7 мг/м³.

Время эффективной работы катализатора составляет в среднем два-три года на угле, пять лет на мазуте и семь лет при работе ТЭС на природном газе.

Состав вредных выбросов в атмосферу на такой ТЭС соответствует требованиям, предъявляемым к выбросам экологически безопасных ТЭС.

2.3.2.3. Гибридный СНКВ–СКВ

При отсутствии достаточного места для размещения каталитического реактора и высоких требованиях к эффективности очистки от NO_x оптимальной для практического применения оказывается гибридная технология, основанная на совместном использовании СКВ- и СНКВ-методов очистки [6, 8].

В случае гибридной технологии в котле реализуется СНКВ процесс. Теоретически аммиак в СНКВ-зону может вводиться в количествах, достаточных для реализации СНКВ и последующего СКВ-процесса. Повышенный пропуск аммиака после СНКВ-установки снижается до нормативного значения на катализаторе, размещенном непосредственно в газоходе или воздухоподогревателе при температуре 300–400 °С. В итоге эффективность очистки может достигать в идеальном случае 95 % и выше.

Для обеспечения 70–80%-ной азотоочистки теоретически можно представить себе использование трех вариантов гибридной технологии:

- простое сочетание СКВ- и СНКВ-технологий (каждая установка имеет собственные системы раздачи аммиака и автоматического управления);
- аммиак вводится только в СНКВ-установку, в каталитическом реакторе происходит доочистка дымового газа (за счет использования аммиака, не прореагировавшего в СНКВ-зоне); используется схема автоматизации СКВ-установки;
- аммиак вводится в СНКВ-зону, реактор с малым количеством катализатора используется лишь для нейтрализации непрореагировавшего аммиака; используется схема автоматизации лишь для СНКВ-установки.

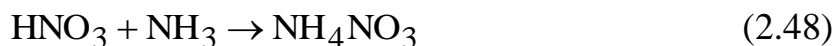
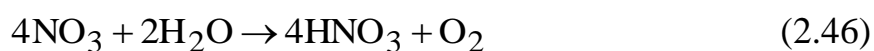
По проведенной оценке при эффективностях СНКВ и СКВ-технологий, равных соответственно 60 и 50 % (суммарно 80 %), при начальной концентрации NO_x 1 000 мг/м³ объем катализатора при гибридной технологии составит лишь 70 % количества, необходимого для СКВ-процесса [18].

При оценке эксплуатационных затрат гибридных технологий необходимо учитывать более высокий расход аммиака при СНКВ-процессе и при подаче основного его количества в СНКВ-зону.

2.3.2.4. Электронно-лучевой способ очистки дымовых газов от NO_x и SO_2

Электронно-лучевой способ (ЭЛС) основан на облучении дымовых газов потоком β -частиц (электронов). В результате протекания радиационно-химических реакций образуются реакционно-активные компоненты: O^- , OH^- и H_2^- . Они взаимодействуют с NO_x и SO_2 , в результате чего получаются более высокие оксиды азота NO_3 и серы SO_3 , которые с водяным паром образуют пары азотной и серной кислот [8].

При взаимодействии с аммиаком, который вводится в газопоток до стадии облучения, получают твердый нитрат и сульфат аммония. Эти реакции с O^- имеют вид:



Этот способ позволяет улавливать до 90 % оксидов серы и азота.

Достоинствами способа являются:

- 1) одновременная очистка дымовых газов как от NO , так и от SO_2 ;
- 2) отсутствие отходов;
- 3) получение товарных продуктов;
- 4) возможность удобного размещения установки на действующих электростанциях.

К недостаткам ЭЛС следует отнести:

- 1) высокие капитальные затраты;
- 2) необходимость дополнительной очистки уходящих газов от твердых частиц сульфата и нитрата аммония;
- 3) психологическое воздействие на людей понятия «радиационная защита».

Контрольные вопросы

1. Опишите пути образования термических оксидов азота.
2. Охарактеризуйте источники оксидов азота.
3. Перечислите первичные мероприятия, направленные на уменьшение выбросов NO_x .
4. В чем суть трехступенчатого сжигания топлива?
5. Что такое «рециркуляция дымовых газов»?
6. С какой целью применяются комбинации первичных мероприятий?
7. Расшифруйте аббревиатуры «СКВ», «СНКВ».
8. Назовите достоинства и недостатки гибридного метода уменьшения соединений азота в дымовых газах СКВ, СНКВ.
9. Как диоксид серы SO_2 влияет на окружающую среду?
10. Перечислите пути сокращения выбросов соединений серы на ТЭС.
11. Охарактеризуйте прямой и косвенный методы очистки жидких топлив от серы.
12. Опишите технологию связывания соединений серы в процессе горения.
13. Какие способы очистки дымовых газов от SO_2 Вы знаете?
14. В чем суть конструктивного и технологического методов снижения выброса золовых частиц из топок котлов?
15. Перечислите способы отделения взвешенных частиц от взвешивающей среды (газа) и охарактеризуйте их.
16. Назовите достоинства и недостатки мокрых инерционных и циклонных золоуловителей.
17. Чем отличаются тканевые фильтры и электрофильтры?

Глава 3. ЗАЩИТА ГИДРОСФЕРЫ ОТ ВЛИЯНИЯ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

3.1. Очистка шахтных сточных вод

Под шахтными водами принято понимать все воды, проникающие в выработанное пространство и проходящие через водоотливное хозяйство шахты. Притоки воды в шахты изменяются в пределах от 100 до 4 000 м³/ч и более [19].

Химический состав загрязнений шахтных вод обусловлен влиянием естественных процессов, происходящих в массиве горных пород, в горных выработках, водоносных горизонтах, когда шахтная вода вступает в контакт с углем и вмещающими породами. Концентрации ингредиентов, входящих в состав примесей шахтных вод, значительно превышают ПДК по сбросу в природные водоемы, особенно рыбохозяйственного назначения. В состав таких загрязнений входят: взвешенные нерастворенные вещества (1–6 г/л), минеральные соединения (480–870 мг/л), соли кальция и магния (5–30 мг-экв/л), обуславливающие жесткость шахтных вод; соли тяжелых металлов (меди, цинка, никеля, молибдена, хрома, марганца, алюминия, стронция, кремния, железа и других); органические загрязнения, находящиеся в растворенном и взвешенном состоянии; бактериальные загрязнения.

Основными способами очистки шахтных вод являются отстаивание, осветление в слое взвешенного осадка, фильтрование, а также удаление взвешенных веществ под действием центробежных сил.

3.1.1. Отстаивание

Наибольшее распространение на предприятиях угольной промышленности получил способ отстаивания. Отстаивание применяется как без обработки воды реагентами, так и с предварительной обработкой коагулянтами и флокулянтами. Безреагентное отстаивание проводится в горизонтальных секционных отстойниках небольшой емкости в течение 6 ч. Такой метод обеспечивает очистку от взвешенных веществ в среднем до 50–200 мг/л, что недостаточно для сброса в водные объекты и подачи на фильтры доочистки продолжительностью до 6 ч. Недостатком горизонтальных секционных отстойников является тот факт, что образующийся осадок обладает сравнительно высокой плотностью и плохо удаляется гидравлическим способом, а удаление осадка путем его гидроразмыва и перекачки шламовыми насосами в илонакопители или иловые площадки нетехнологичен,

особенно в зимних условиях. Поэтому очистка отстойников от осадка производится обычно один раз в год в летний период, что приводит к переполнению его осадком и неэффективной работе в течение длительного периода времени.

Безреагентное отстаивание в бетонированных и земляных отстойниках большей емкости, рассчитанных на 6–24 ч, обеспечивает более высокую эффективность, однако во многих случаях качество очищенной воды также не удовлетворяет предъявляемым требованиям.

Пруды-отстойники являются наиболее эффективными сооружениями по безреагентному отстаиванию шахтных вод и позволяют снизить содержание взвешенных веществ до величин, не превышающих 30–50 мг/л. При последовательной работе двух-трех прудов-отстойников эффективность очистки значительно увеличивается. При невысоких требованиях к качеству воды, подлежащей сбросу в водные объекты, и небольшом содержании тонкодисперсных частиц в исходной воде эти сооружения могут успешно использоваться в качестве самостоятельного способа очистки, а в остальных случаях – в качестве первой ступени очистки перед фильтрованием. Пруды-отстойники должны рассчитываться на длительное накопление осадка в течение не менее 10 лет.

Вертикальные и тонкослойные отстойники рассчитаны, как правило, на работу с предварительной обработкой шахтных вод реагентами и удалением осадка под гидростатическим давлением без выключения их из работы. Из этих двух типов сооружений более компактны, эффективны и удобны в эксплуатации тонкослойные отстойники, обеспечивающие при этом максимальную удельную нагрузку на поверхность для сооружений отстойного типа [20].

3.1.2. Осветление

Осветление в слое взвешенного осадка является весьма эффективным способом очистки шахтных вод [21]. На предприятиях угольной промышленности преимущественное применение получили осветлители коридорного типа с вертикальным осадкоуплотнителем.

Работа осветлителей основана на явлении контактной коагуляции, которая происходит при прохождении очищаемой воды, подвергшейся реагентной обработке, через слой взвешенного осадка, находящийся в динамическом равновесии благодаря равенству скорости восходящего потока и средней скорости осаждения скоагулированных частиц. Необходимым условием эффективной работы осветлителей служит сохранение постоянства расхода и температуры очищаемой воды. Верхний предел содержания

взвешенных веществ, поступающих на очистку шахтных вод, не ограничен, а нижний предел составляет 150 мг/л, содержание взвешенных веществ в очищенной воде не превышает 10–15 мг/л. В связи с этим, данный способ может применяться как для одноступенчатой очистки шахтных вод, так и в качестве первой ступени очистки перед фильтрованием.

3.1.3. Фильтрование

Фильтрование, в отличие от отстаивания и осветления в слое взвешенного осадка, является методом тонкой (глубокой) очистки воды и осуществляется пропусканием воды через зернистые или пористые материалы. Осветление воды при фильтровании происходит в результате действия двух противоположных процессов: адгезии твердых или скоагулированных частиц к поверхности зерен фильтрующей загрузки и отрыва, ранее задержанных частиц и переноса их гидродинамическим потоком жидкости в следующие по ходу потока слои фильтрующего материала [21].

Отличительная особенность способа фильтрования заключается в высокой чувствительности его к содержанию взвешенных веществ в исходной воде. С повышением исходного содержания взвешенных веществ эффективность очистки и длительность цикла фильтрования резко снижается, существенно возрастает расход воды на промывку фильтров. В связи с этим предельное значение концентрации взвешенных веществ в исходной воде ограничено: для скорых открытых однослойных зернистых фильтров – 30 мг/л, для скорых напорных и открытых двухслойных фильтров – 50 мг/л и для контактных осветлителей – 150 мг/л.

Из механизма процесса фильтрования следует также, что его эффективность может быть повышена путем реагентной обработки поступающей на очистку воды. Способность коагулянтов и флокулянтов к образованию хлопьев, увеличению их плотности, прочности и сил адгезии позволяет оптимизировать процесс фильтрования и добиваться максимальной его эффективности. Таким образом, с учетом особенностей способа фильтрования целесообразной областью его применения следует считать одноступенчатую очистку шахтных вод с небольшим исходным содержанием взвешенных веществ или вторую ступень очистки после отстаивания и осветления в слое взвешенного осадка.

3.1.4. Гидроциклоны

Прогрессивным направлением в технологии очистки сточных вод угольных предприятий является удаление взвешенных веществ под действием центробежных сил [21]. Силы, действующие на выделяемые

частицы в центробежных устройствах, больше сил тяжести, действующих в отстойниках. Вследствие этого повышается в несколько раз их производительность, уменьшаются их размеры. На горных предприятиях широко распространены напорные конические гидроциклоны. Загрязненная вода подается под давлением 0,05–0,3 МПа внутрь гидроциклона, поступает в цилиндрическую часть и вращательно движется в ней вместе с примесями. Крупные примеси отжимаются возникающей центробежной силой к стенкам и вместе с жидкостью по винтовой спирали поступают к сливу. Осветленная вода движется вверх по оси гидроциклона. Эффективность очистки в гидроциклонах составляет в среднем 70–80 %.

3.2. Сточные воды систем охлаждения ТЭС

В прямоточной системе водоснабжения вода из реки или другого водоема подается на объект, а оттуда возвращается в реку ниже по течению. Эта система применяется, если минимальный расход воды реки значительно больше потребности объекта в воде. В настоящее время прямоточные системы технического водоснабжения на ТЭС практически не применяются из-за значительного роста единичных мощностей паротурбинных ТЭС и отсутствия крупных рек с достаточным дебетом воды.

Прямоточная система водоснабжения может быть применена только в случае технической невозможности или экономической нецелесообразности иной [22].

Мало таких крупных рек даже в России, не говоря уже о Западной Европе. Отказ от прямоточного охлаждения для ТЭС обусловлен кроме технических причин экологическими факторами, не допускающими повышения температуры в реках более чем на 3–5 °С.

При прямоточной системе свежая вода проходит один раз через конденсаторы турбин и сбрасывается в водоисточник. На это расходуется о 99,9 % свежей воды, подаваемой на ТЭС.

Сточные воды прямоточных систем охлаждения, сбрасываемые после конденсаторов турбин, газо-, воздухо-, маслоохладителей и других теплообменных аппаратов, только нагревающие воду природных источников, но не загрязняющие ее химическими или механическими примесями, не требуют очистки. Температура сбрасываемой воды в таких системах обычно превышает температуру водоисточника на 8–10 °С, вызывая его тепловое «загрязнение». При расчете сбросов подогретой воды необходимо учитывать, что расчетная летняя температура водных объектов питьевого и культурного назначений не должна повышаться более чем на 3 °С, зимняя – более, чем на 5 °С. Для обеспечения требуемого уровня температуры воды применяют:

- 1) глубинные водозаборы и поверхностные выпуски;
- 2) брызгальные устройства над акваторией отводящих каналов;
- 3) увеличение кратности охлаждения конденсаторов в зимний период;
- 4) эжектирующие водовыпуски.

В системе оборотного охлаждения (СОО) с градирнями продувочные воды являются не только подогретыми, но и характеризуются повышенным содержанием солей. Коэффициент концентрирования в таких системах подсчитывается как

$$k_k = 1 + \frac{Q_{\text{исп}}}{Q_{\text{прод}} + Q_{\text{ун}}}, \quad (3.1)$$

где $Q_{\text{исп}}$, $Q_{\text{прод}}$, $Q_{\text{ун}}$ – количества соответственно испаряющейся воды, продувочной воды и капельного уноса.

Исходя из этой формулы, сокращение величин продувки и капельного уноса приводят к увеличению k_k и росту содержания солей в системе охлаждения. При использовании маломинерализованных добавочных вод в СОО ее продувочные воды могут быть востребованы в других водоиспользующих системах ТЭС. Так, нормативными документами рекомендуется направлять продувку СОО для использования в ВПУ в том случае, если коэффициент концентрирования в градирнях не превышает 1,5 при содержании исходной воды менее 500 мг/дм³ и не превышает 1,2 при содержании более 500 мг/дм³.

Примером комбинированной работы СОО и ВПУ ТЭС, рассчитанной на приготовление большого количества подпиточной воды для закрытой системы теплоснабжения, может служить схема, приведенная на рис. 3.1.

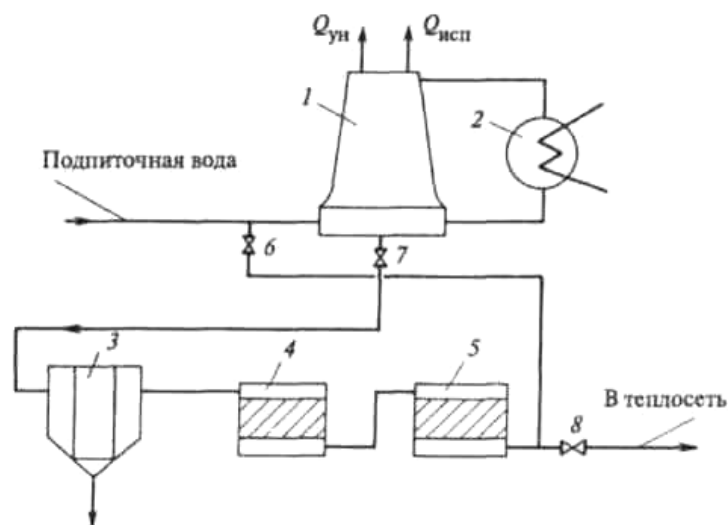


Рис. 3.1. Комбинированная схема работы СОО и ВПУ ТЭС с закрытой системой теплоснабжения: 1 – градирня; 2 – конденсатор; 3 – осветлитель; 4 – осветлительный фильтр; 5 – Na-катионитный фильтр; 6–8 – задвижки

Согласно схеме, например, в режиме наибольшей зимней нагрузки максимальное значение подпитки теплосети (ПТС) определяет максимальную продувку СОО и соответственно снижение коэффициента концентрирования (задвижка 6 закрыта, задвижки 7 и 8 открыты). В летний период при уменьшении расхода воды на подпитку теплосети освобождающаяся мощность ВПУ ПТС используется для умягчения части подпиточной воды СОО (задвижка 6 открыта), что снижает опасность нарушения водно-химического режима системы охлаждения.

3.3. Сточные воды водоподготовительных установок

Проблема утилизации промывной воды является актуальной для крупных станций водоподготовки в России. В процессе водоподготовки на фильтровальных станциях образуется большое количество промывной воды фильтров и контактных осветлителей (15–30 % от объема обрабатываемой воды). Для промывной воды, сбрасываемой со станций, характерны высокие значения концентраций алюминия, железа, взвешенных веществ, окисляемости, а также различные соли серной и соляной кислот с концентрацией, достигающей десятков грамм на кубический дециметр, переходящие в стоки при регенерации фильтров. Согласно СП 31.13330.2012 «Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.04.02-84» промывные воды следует направлять на повторное использование, однако на практике не удается полностью утилизировать промывные воды по ряду причин: ухудшение процессов хлопьеобразования и отстаивания взвеси, сокращение продолжительности фильтроциклов. В настоящее время большая часть (около 75 %) промывных вод либо сбрасывается в бытовую канализацию, либо после предварительного отстаивания (или без него) в природный водоем. При этом в первом случае значительно возрастает нагрузка на канализационные сети и сооружения биологической очистки, нарушается их нормальный режим работы. Во втором случае происходит загрязнение природных водоемов токсичным осадком, что негативно сказывается на их санитарном состоянии [9, 23].

С учетом известных значений ПДК вредных веществ в водоемах стоки ВПУ перед их сбросом должны соответствующим образом очищаться, причем затраты на обезвреживание стоков обычно сопоставимы с затратами на приготовление воды требуемого качества.

Эксплуатация ВПУ связана с потреблением больших количеств извести, коагулянта, регенерантов (H_2SO_4 , $NaOH$ и $NaCl$). Стоки предочистки содержат шлам различного состава, определяемого ее типом. Основная часть

регенерирующих веществ переходит в сточные регенерационные воды и является потенциальным источником загрязнения природных водных объектов (табл. 3.1). Количественные характеристики сбросных вод ВПУ определяются при проведении технологических расчетов.

Таблица 3.1

Характеристики основных солевых стоков ионитных ВПУ

Схема обработки воды	Общая жесткость, мг - экв/дм ³	Концентрация, г/дм ³		
		Солесодержание	Хлориды	Сульфаты
Na-катионирование	58–160	9,9–14,6	6,0–8,1	Исходная
H-катионирование с «голодной» регенерацией	40–64	3,3–4,7	Исходная	1,75–3,0
Химическое обессоливание по схеме «цепочки»	15,6–19,0	3,2–4,5	0,1–0,4	1,8–2,2

Сброс вод, содержащих такие загрязнения, даже после взаимной нейтрализации кислых и щелочных стоков обессоливающих установок (рис. 3.2) разрешается в таких редких случаях, когда естественный водоем имеет мощный дебит, способный разбавлять вредные химические вещества до значений их ПДК.

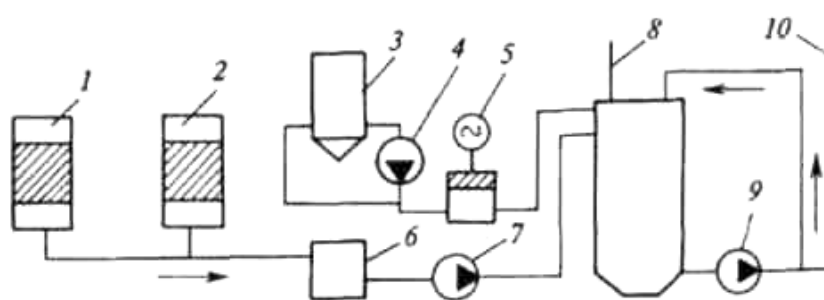


Рис. 3.2. Схема нейтрализации сточных вод обессоливающих установок: 1 – Н-катионитные фильтры; 2 – анионитные фильтры; 3 – мешалка известкового молока; 4, 7 – перекачивающие насосы; 5 – насос-дозатор; 6 – промежуточный бак для сбора регенерационных вод; 8 – бак-нейтрализатор; 9 – насос перемешивания и сброса; 10 – охлаждающая или природная вода

Совершенствование экономичных и экологических схем ВПУ в настоящее время ведется в следующих направлениях:

- 1) противоточное ионирование;
- 2) обессоливание на основе мембранных методов;
- 3) малоотходные схемы ВПУ.

Новые ВПУ, основанные на противоточных технологиях, внедрены на Калининской АЭС, Дзержинской ТЭЦ, ТЭЦ-ЭВС-2 ОАО «Северсталь» и др. Опыт эксплуатации противоточных технологий доказывает их преимущества по сравнению с традиционными: снижение количества необходимого водоподготовительного оборудования; высокие обменные емкости ионитов; высокое качество фильтрата, которое обеспечивается при небольших расходах реагентов на регенерацию (1,8–2,2 г-экв/г-экв); уменьшение количества высокоминерализованных сточных вод. Однако из-за отсутствия второй (барьерной) ступени и трудности определения момента вывода на регенерацию отключение противоточного фильтра часто проводится по количеству пропущенной воды со значительным запасом, что ведет к недовыработке обессоленной воды. При противоточной регенерации увеличивается интенсивность регенерации и, как следствие, количество переключений, что требует высокой культуры обслуживания таких установок, надежной арматуры, средств автоматизации и контроля, требующих, в свою очередь, применения осветленной воды, глубоко очищенной от взвешенных, органических веществ, а также соединений железа. Эффективность применения противотока тем выше, чем качественнее поступающая на фильтры вода.

Некоторые новые ВПУ основаны на применении обратного осмоса для деминерализации воды с использованием в качестве предочистки традиционных технологий (осветлителей, механических фильтров). Примерами таковых являются ВПУ на ТЭЦ-12 ОАО «Мосэнерго», ТЭЦ ОАО «Северсталь», Уфимской ТЭЦ-1, ОАО «Ивановские ПГУ» (ИвПГУ) (рис. 3.3).

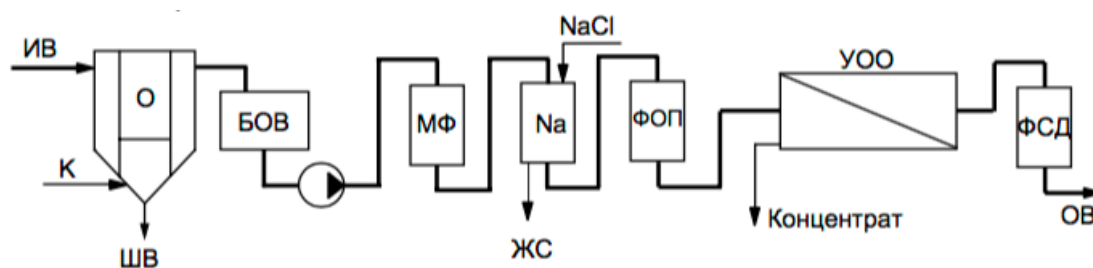


Рис. 3.3. Схема ВПУ ОАО «Ивановские ПГУ»: ИВ – исходная вода; О – осветлитель; БОВ – бак осветленной воды; МФ – механический фильтр; Na – Na-катионитный фильтр; ФОП – фильтр-органопоглотитель; К – коагулянт; ШВ – шламовые воды; ОВ – обессоленная вода; ЖС – жесткий сток; УОО – установка обратного осмоса; ФСД – фильтр смешанного действия

Использование обратного осмоса дает возможность извлекать на одной ступени очистки до 96–98 % солей, что близко к эффективности одной ступени ионного обмена.

Сравнение экономической эффективности обессоливания воды ионным обменом и обратным осмосом показало, что при солесодержании более 150–300 мг/л обратный осмос экономичнее даже противоточного ионирования [24]. Имеющийся опыт эксплуатации установок обратного осмоса (УОО) свидетельствует о том, что основным фактором, от которого зависит работа мембран, является соблюдение норм качества воды, подаваемой на обработку. Производителями мембран к питательной воде, идущей на УОО, предъявляются требования, представленные в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Требования к воде, поступающей на УОО

Показатель	Значение
Температура, °С	до 45
Концентрация свободного хлора, мг/л	до 0,1
Показатель рН во время работы	2–11
Показатель рН во время промывки	1–12
Концентрация железа, мг/л	до 0,1
Содержание органических веществ по общему органическому углероду (ТОС), мг/л	до 3
Концентрация марганца, мг/л	до 0,1
Мутность, NTU	до 0,1
Концентрация масел и нефтепродуктов, мг/л	до 0,1
Коллоидный индекс SDI	до 5

Однако опыт показывает, что в схемах с традиционной технологией предочистки качество воды, поступающей на УОО, часто не отвечает требованиям по содержанию железа и окисляемости. Необходимое качество такой воды может быть достигнуто применением ультрафильтрации на стадии предочистки. Ультрафильтрация позволяет не только получать воду, практически свободную от механических примесей, но и совместно с коагуляцией удалять значительное количество органики (до 60 % от исходного количества), а также кремниевую кислоту. В качестве примера можно привести результаты работы установки ультрафильтрации (УУФ) на Череповецкой ГРЭС (источник водоснабжения – р. Суда) (табл. 3.3).

Внедрение УУФ на стадии предочистки значительно увеличило производительность обратноосмотических мембран, в несколько раз сократило частоту химических промывок, высвободило производственные площади, уменьшило расход коагулянта, обеспечило возможность отказа от извести.

Результаты работы установки УФ

Показатели	Исходная вода	Фильтрат
Общая жесткость, мг - экв/л	0,7	0,7
Общая щелочность, мг - экв/л	0,6	0,012
Окисляемость, мг O ₂ /л	36,8	9,2
Концентрация хлоридов, мг/л	3,3	16
Содержание железа (общее), мг/л	1,93	0,085
Содержание алюминия, мг/л	–	0,016
Цветность	> 80	25

Совместное использование ультрафильтрации и обратного осмоса дает возможность создать малореагентную систему водоподготовки для получения фильтрата с удельной электропроводностью на уровне 1–5 мкСм/см. В таких схемах дальнейшее доведение качества воды до нормативных значений обычно производится ионообменным методом (рис. 3.4). Такая технология применяется на Новочеркасской ГРЭС, Заинской ГРЭС, Орловской ТЭЦ и др.

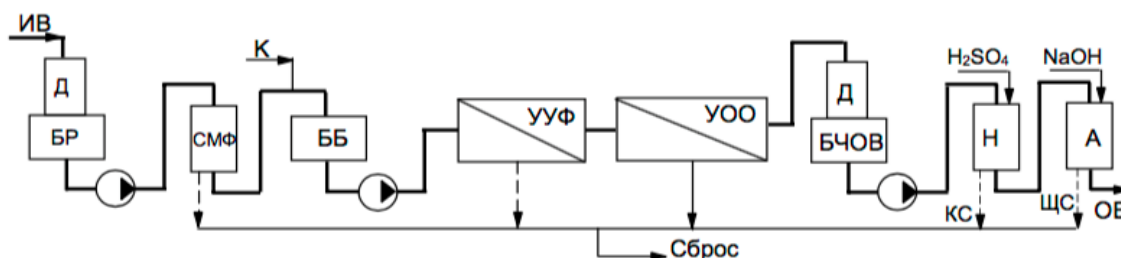


Рис. 3.4. Схема комбинированной установки для подготовки глубоко обессоленной воды с применением ионообменной доочистки: Д – декарбонизатор; БР – емкость разрыва струи; СМФ – самопромывные механические фильтры; ББ – буферные емкости; УУФ – установка ультрафильтрации; УОО – установка обратного осмоса; БЧОВ – бак частично обессоленной воды; Н – Н-катионитный фильтр; А – ОН-анионитный фильтр; КС – кислый сток; ЩС – щелочной сток

Основным недостатком всех мембранных систем является достаточно низкий коэффициент использования исходной воды. Если в традиционной ионообменной схеме с коагуляцией и механической фильтрацией собственные нужды составляют 10–20 %, то для типичного сочетания ультрафильтрации и обратного осмоса этот показатель равен 40–50 %. Однако следует учитывать, что концентраты от установок ультрафильтрации и обратного осмоса по солесодержанию часто находятся в пределах нормируемых значений и могут быть беспрепятственно сброшены.

С точки зрения обеспечения минимального расхода реагентов и наивысшей экологичности при высоком качестве обессоленной воды наибольшую эффективность имеют комплексные ВПУ, состоящие исключительно из мембранных модулей различного назначения: ультра- и нанофильтрации, обратного осмоса, мембранной дегазации и электродеионизации, называемых в целом интегрированные мембранные технологии (ИМТ).

В комплексной мембранной установке (рис. 3.5) вода доочищается на узле электродеионизации (УЭДИ). Электродеионизация (ЭДИ, EDI) – это процесс непрерывного обессоливания воды с использованием ионообменных смол, ионоселективных мембран и постоянного электрического поля.

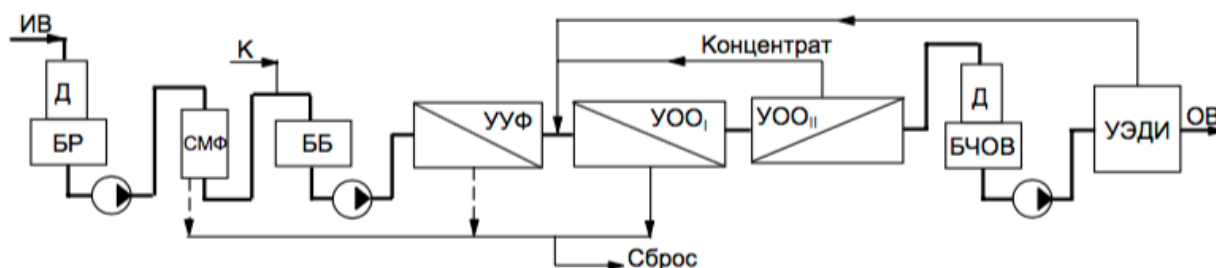


Рис. 3.5 Схема комплексной установки для подготовки глубоко обессоленной воды с применением доочистки электродеионизацией

При степени использования исходной воды 90–95 % очищенная вода имеет удельную электропроводность на уровне 0,1 мкСм/см (табл. 3.4), а также минимальное кремнесодержание и общий органический углерод. При этом солесодержание концентрата обычно ниже, чем солесодержание воды, подаваемой на установку обратного осмоса, поэтому он весь возвращается на вход этой установки на повторное использование.

Таблица 3.4

Характеристики работы установок электродеионизации

Показатель	ЭДИ1	ЭДИ2	ЭДИ3
Удельная электропроводность обрабатываемой воды, мкСм/см	2,5	2,5	2,5
Удельная электропроводность фильтрата, мкСм/см	0,11	0,15	0,09
Производительность по фильтрату, м ³ /ч	10	10	10
Расход концентрата, м ³ /ч	1,05	1,0	1,05
Перепад давления на входе и выходе, ата	1,9	1,3	0,7
Перепад давления фильтрата и концентрата, ата	0,4	0,3	0,3
Напряжение, В	614	614	614
Сила тока, А	3	3	3

Все производители установок электродеионизации предъявляют очень высокие требования к воде, подаваемой на установку ЭДИ, вне зависимости от ее конструкции (табл. 3.5).

Таблица 3.5

Типичные требования производителей к питающей воде установок ЭДИ

Характеристика исходной воды	Значения
рН	5–9
Удельная электропроводимость, мкСм/см	< 20
Общая жесткость, мг/л CaCO ₃	< 1,0
Общий органический углерод, мг/л	<0,5
Содержание свободного хлора, мг/л	<0,05
Содержание соединений Fe, мг/л	< 0,01
Кремнесодержание (SiO ₂), мг/л	<1,0
Концентрация углекислого газа (CO ₂), мг/л	< 5,0
Мутность, NTU	< 1,0
Рабочая температура, °С	5–45
Входное давление, атм	0,7–5,0

Комплексная мембранная установка для подготовки глубоко обессоленной воды, выполненная в соответствии с данной схемой, обеспечивает минимальный объем отходов. Отпадает необходимость в кислотно-щелочном хозяйстве, снижаются эксплуатационные расходы и резко улучшаются экологические параметры. Комплексная мембранная установка успешно эксплуатируется на Первомайской ТЭЦ-14 [25].

В качестве примера, связанного с изменением внутренних взаимосвязей в традиционных технологических схемах, рассмотрим принципиальную схему Na-катионирования с частичной утилизацией сточных вод (рис. 3.6).

Водопроводная вода умягчается на Na-катионитных фильтрах, деаэрируется и направляется на подпитку теплосети. Промывочные воды фильтров собираются в баке 6, осветляются в фильтре 7 и поступают в бак 8, служащий также для сбора маломинерализованной части отмывочных вод фильтров. Из бака 8 вода направляется для взрыхления рабочих фильтров, а ее избыток смешивается с исходной водой. Основная часть регенерационных сточных вод 10 собирается в баке-кристаллизаторе 11 и подвергается содово-известковой обработке для снижения концентраций ионов Ca²⁺ и Mg²⁺.

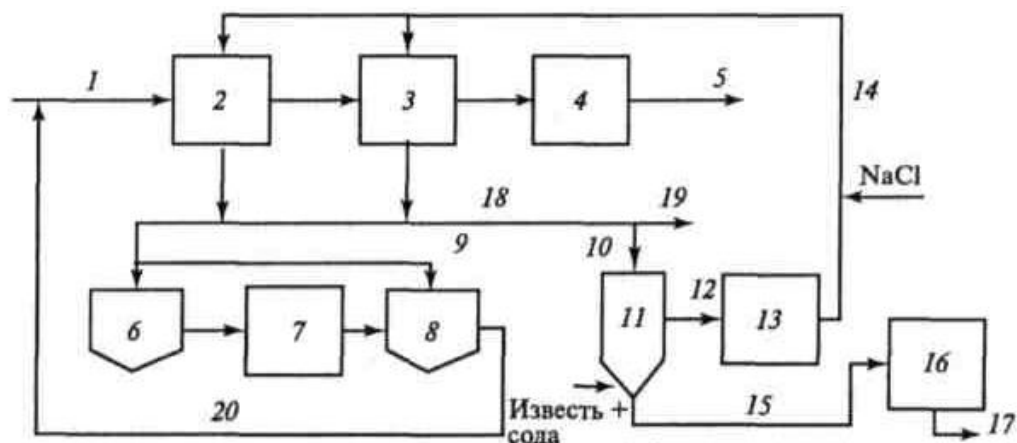


Рис. 3.6. Принципиальная схема Na-катионирования с частичной утилизацией сточных вод: 1 – исходная вода; 2, 3 – Na-катионитные фильтры; 4 – деаэрактор; 5 – умягченная вода в теплосеть; 6, 8 – баки; 7, 13 – осветлительные фильтры; 9 – отмывочные воды; 10, 18 – регенерационные сточные воды; 11 – кристаллизатор; 12 – осветленный раствор; 14 – регенерационный раствор; 15 – осадок; 16 – вакуум-фильтр; 17 – обезвоженный осадок; 19 – сброс в канализацию; 20 – осветленные сточные воды

Осветленный раствор пропускается через механический фильтр, доукрепляется NaCl и используется повторно для регенерации катионитных фильтров. Шлам 15 из кристаллизатора подается для обезвоживания на вакуум-фильтр и затем утилизируется. Внедрение приведенной схемы позволило на 60 % сократить сброс в канализацию минеральных солей. К недостаткам рассмотренной технологии следует отнести ее сложность, необходимость использования дополнительных реагентов и оборудования.

3.4. Воды систем гидрозолоудаления

На ТЭС, сжигающих твердое топливо, зола и шлак обычно удаляются водой на золоотвалы. Расход воды на транспортировку золы и шлака составляет 15–40 м³/т. За счет растворения примесей транспортная вода насыщается ими в концентрации до нескольких тысяч миллиграмм на кубический дециметр, ее рН может меняться от сильноокислого до сильнощелочного. Состав и степень загрязненности вод систем гидрозолоудаления (ГЗУ) должны приниматься на основе фактических данных химического контроля. Для поддержания солевого баланса и предотвращения интенсивного образования отложений в пульпопроводах, насосах, в линиях осветленной воды часть оборотной воды сбрасывают в водоемы и заменяют свежей. Однако сбросные воды систем ГЗУ могут содержать токсичные элементы – мышьяк, ванадий, фтор и другие, поэтому по современной классификации они относятся к токсичным стокам. В этой связи оборотные

системы на новых и реконструируемых ТЭС должны быть бессточными с возможностью использования воды из оборотных систем для производственных нужд ТЭС с возвратом их в систему ГЗУ. При создании оборотных систем ГЗУ без продувок целесообразно исключить сброс в них ливневых вод, продувочных вод градирен, минерализованных сточных вод ВПУ. При дефицитном водном балансе допустимо сохранить подачу в систему ГЗУ продувочной воды осветлителей и сточных вод от химических очисток оборудования [23].

Применение оборотных систем ГЗУ не является единственным решением проблемы загрязнения окружающей среды. В ряде зарубежных стран применяют сухие методы складирования золы и шлака с последующей их переработкой в механически прочные и химически инертные гранулы.

Первой генкомпанией, решившейся заменить мокрое золошлакоудаление на сухое (СЗШУ), стала «Энел Россия», владеющая крупнейшей на постсоветском пространстве угольной ТЭС. Установленная электрическая мощность Рефтинской ГРЭС составляет 3,8 ГВт, тепловая – 350 Гкал/ч. Станция поставляет электроэнергию потребителям Уральского федерального округа, обеспечивая 40% потребления всей Свердловской области. В качестве основного топлива на ГРЭС используется экибастузский каменный уголь, в результате сжигания в год образовывалось до пяти миллионов тонн золы. Как и многие другие угольные станции России, Рефтинская исчерпала ресурс золоотвала [26].

Основное технологическое отличие ГЗУ от сухого золоудаления заключается в способе удаления золы и шлаков из бункеров котельных агрегатов. Гидравлический метод предполагает гашение золошлаковых отходов водой (при этом теряется до 1 % теплового КПД котла) и передачу гидромассы с помощью багерных насосов на золоотвалы. В дальнейшем использовать эту золу невозможно. При сухом золошлакоудалении гашение водой не используется, а применяется пневматическая система удаления продуктов горения. Зола из газоочистных установок через систему пневмокамерных насосов и промежуточных бункеров подаётся по золопроводам на силосный склад. Зола транспортируется подаваемым компрессорной станцией сжатым воздухом. Размер силосного склада зависит от количества сжигаемого топлива. На Рефтинской ГРЭС его мощность составляет до двадцати восьми тысяч тонн – столько станция может произвести золы за два с половиной дня работы при полной нагрузке [26]. Сухую золу, хранящуюся на силосном складе, в дальнейшем можно продать, прежде всего строительным компаниям. В зависимости от спроса золошлаковые материалы со склада направляются либо на узлы выгрузки

сухой золы в железнодорожный и автотранспорт, либо на труболенточный конвейер длиной 4,5 км, доставляющий остатки нереализованной золы в золоотвал. На момент запуска СЗШУ «Энел Россия» заявляла о планах отгружать сторонним покупателям до одного миллиона тонн золы в год – то есть 20 % от годового производства, указывая, что потенциально объём поставок можно увеличить до 100% вырабатываемой золы. Организуя доставку по железной дороге, станция имеет возможность продавать этот побочный продукт потребителям не только Уральского, но и Центрального и Южного федеральных округов. Золошлаки используются как сырьё для производства силикатного кирпича, строительных твинблоков, цементных композиций и других материалов. Сухая зола широко используется в дорожном строительстве для создания земляных насыпей и дорожного покрытия, в сельском хозяйстве – в качестве компонента для удобрений, в ландшафтных проектах и для стабилизации грунтов. Современные технологии, использующие принципы гравитационной и магнитной сепарации, позволяют также извлекать из золы благородные металлы, ртуть и не менее двух сортов железорудного концентрата [27].

3.5. Стоки, загрязненные нефтепродуктами

Мазутное хозяйство, маслосистемы котлотурбинного цеха и электротехнического оборудования, гаражи являются источниками попадания нефтепродуктов в сточные воды ТЭС. Обычно такие воды содержат мазут, смазочные и изоляционные масла, бензин в суммарной концентрации от 30 до 200 мг/дм³ (среднее расчетное значение 100 мг/дм³), а их количество достигает нескольких десятков кубических метров в час в зависимости от типа используемого топлива и установленной мощности ТЭС [23].

Недостаточно очищенные нефтесодержащие сточные воды, попадая в водоемы, образуют пленку на поверхности воды, ухудшая условия аэрации, а тяжелые нефтепродукты, оседая на дно, губительно действуют на водную флору и фауну. Поэтому на нефтепродукты установлены очень жесткие ПДК, так как они являются слабо окисляющимися веществами. Согласно действующим нормативам нефтесодержащие стоки ТЭС должны очищаться и повторно использоваться в качестве исходных вод для ВПУ, СОО и других систем, а уловленные нефтепродукты – сжигаться в котлах.

Методы очистки сточных вод от нефтепродуктов можно классифицировать следующим образом:

- механическая очистка сточных вод от нефтепродуктов (нефтеловушки, песколовки, отстойники, фильтрационные установки и др.);

- физико-химическая очистка производственных сточных вод от нефтепродуктов (флотационные установки с использованием химических реагентов, установки для коллоидных примесей с применением коагулянтов и др.);
- биологическая очистка (биофильтры, биологические пруды, аэротенки и др.);
- реагентные методы (коагуляция, флокуляция, осаждение примесей, флотация, фильтрация, ионный обмен и др.).

В качестве самостоятельного способа механическая очистка сточных вод применяется в тех случаях, когда очищенная таким методом вода пригодна либо для использования в технологических производственных процессах, либо может быть спущена в естественный водоем без нанесения какого-либо вреда его экологическому состоянию. Во всех прочих случаях этот метод служит для первичной очистки воды от примесей нефтепродуктов. Механический метод очистки дает возможность удалить из сточных вод от 60 до 65 % взвешенных частиц различных веществ [28].

Наиболее часто используемыми методами механической очистки стоков от нефтяных и нефтепродуктовых загрязнений являются: отстаивание, центробежное удаление загрязняющих воду примесей и фильтрация.

Во время отстаивания те примеси, плотность которых выше, чем плотность воды, оседают на дно, а те примеси, чья плотность ниже водяной, всплывают на поверхность. Сооружения для такого способа механической очистки называются отстойники. Они представляют собой резервуары, находящаяся в которых сточная вода очищается, находясь в состоянии покоя [28].

На предприятиях нефтедобычи, нефтепереработки и нефтетранспорта, как правило, используются так называемые статические виды отстойников. Выдержка в них стоков в течение от шести часов до суток позволяет удалить от 90 до 95 % легко отделимых видов загрязнений и некоторую часть примесей трудноудаляемого типа.

Чтобы эффективно удалить из сточных вод нефтяные загрязнения, которые находятся в вязко-текучем или жидком агрегатном состоянии, нередко применяют такой способ очистки, как фильтрация. Этот метод традиционно используется для удаления примесей, представленных мелкими твердыми частицами, которые задерживаются либо специальными сетками, либо пористыми зернистыми материалами или тканями. Однако, очистка стоков методом фильтрования от нефтяных и нефтепродуктовых примесей основана том, что вязкие частицы указанных примесей прилипают к поверхности материала фильтра.

Грубодисперсные частицы нефтепродуктов задерживаются с помощью сеток, изготовленных из разных материалов, а также при помощи специальной фильтровальной ткани. Такая фильтрация происходит в микрофильтрах,

которые представляют собой вращающиеся барабаны, в которых плотно закреплены фильтрующие материалы. Диаметр таких барабанов, которые вращаются в горизонтальной плоскости, варьируется от полутора до трех метров.

Принцип такого фильтрования заключается в следующем: сточные воды, загрязненные нефтепродуктовыми примесями, поступают внутрь вращающихся фильтровальных барабанов, а очищенная вода выходит наружу сквозь фильтрующие материалы. Само фильтрование основано на разнице уровней очищаемой воды внутри барабана и снаружи его.

Глубокая очистка воды от вредных нефтяных загрязнений подразумевает использование фильтров каркасного типа. В качестве фильтрующих материалов в таких фильтрах используются: зернистые пористые материалы, кварцевый песок, антрацит, керамзит, котельный или металлургический шлак, пенополистирол.

Фильтры каркасного типа, в конструкции которых использованы волокнистые и эластичные материалы, обладают повышенной способностью к задержанию нефтепродуктов [29].

Эффективное удаление из воды нерастворенных нефтепродуктов достигается благодаря способности последних к адгезии на поверхности материала загрузки фильтра. Эффективность фильтрования во многом определяется свойствами зернистой загрузки: крупность, форма, шероховатость, порозность слоя, размер отдельных межзеренных пор, однородность зерен [29].

На ТЭС очистка вод от нефтепродуктов осуществляется комплексным сочетанием методов (рис. 3.7), позволяющим обеспечить остаточное нефте-содержание на уровне $0,5-1,0 \text{ мг/дм}^3$.

Основными элементами комплексной схемы очистки от нефтепродуктов являются нефтеловушка и флотатор. В основу нефтеловушки, схема которой представлена на рис. 3.8 положен принцип отстаивания, реализуемый за счет разности плотностей воды и нефтепродуктов.

Сточная вода подается в приемную камеру 2 и, пройдя под первой полупогруженной перегородкой 5, попадает в отстойную камеру 3, где и происходит процесс разделения эмульсии. Очищенная вода 4, пройдя под второй полупогруженной перегородкой 5, выводится из нефтеловушки, а частицы нефтепродуктов, всплывающие на поверхность воды, образуют пленку 7, которая перемещается специальным движущимся скребковым устройством к нефтесборным щелевым трубам 6. При отстаивании всплытие капель нефтепродуктов происходит медленно – со скоростью порядка долей миллиметра в секунду.

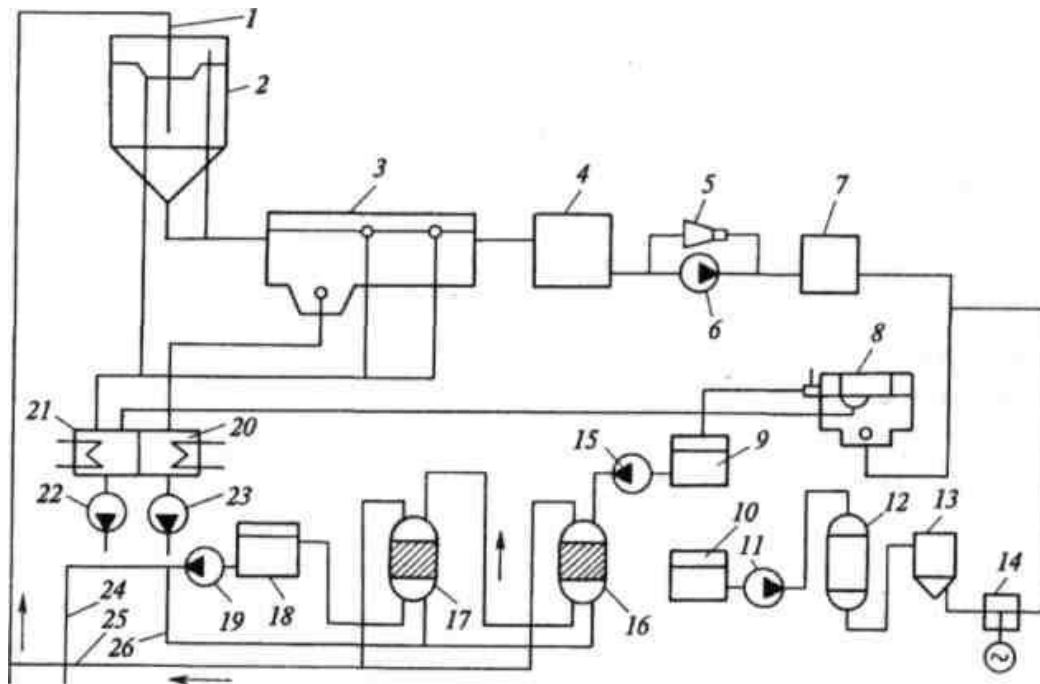


Рис. 3.7. Схема очистки вод, загрязненных нефтепродуктами: 1 – трубопровод замазученных и замасленных вод; 2 – приемный бак-отстойник; 3 – нефтеловушка; 4 – промежуточный резервуар; 5 – эжектор насыщения воды воздухом; 6 – насос; 7 – напорный бак; 8 – флотатор; 9 – промежуточный резервуар; 10 – ячейка коагулянта; 11 – насос для перекачки коагулянта; 12 – осветлительный фильтр коагулянта; 13 – бак-мерник коагулянта; 14 – насос-дозатор коагулянта; 15 – насос для подачи воды на фильтр; 16 – двухслойный осветлительный фильтр; 17 – фильтр с загрузкой активированного угля; 18 – резервуар очищенной воды; 19 – насос очищенной воды; 20 – емкость для сбора осадка; 21 – емкость для сбора уловленных нефтепродуктов; 22 – насос для подачи уловленных нефтепродуктов на сжигание; 23 – насос для подачи осадка в накопители; 24 – трубопровод очищенной воды на повторное использование; 25 – трубопровод сбора промывочных вод фильтров; 26 – трубопровод промывки фильтрующих материалов

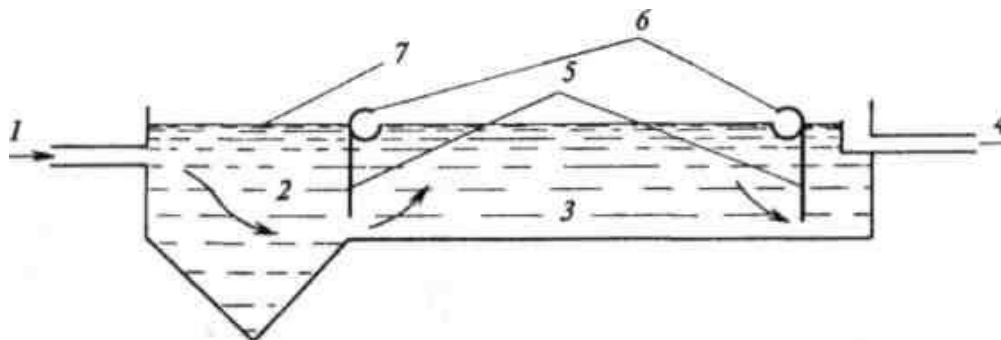


Рис. 3.8. Схема нефтеловушки: 1 – сточная вода; 2 – приемная камера; 3 – отстойная зона; 4 – очищенная вода; 5 – вертикальные полупогруженные перегородки; 6 – нефтесборные щелевые трубы; 7 – пленка всплывших нефтепродуктов

Флотационная очистка воды заключается в образовании комплексов, состоящих из частиц нефтепродуктов и пузырьков воздуха, которыми предварительно насыщают обрабатываемую воду, реализуя принцип напорной флотации [8]. При этом скорость всплытия комплекса превышает на два-три порядка скорость всплытия капли масла. При напорной флотации (рис. 3.9) воздух растворяется в воде под избыточным давлением до 0,5 МПа. Воздух с помощью эжектора подается в трубопровод перед насосом, а затем водовоздушная смесь в течение 8–10 мин находится в специальной напорной емкости, откуда направляется во флотатор. Во флотаторе происходит снижение давления, образование пузырьков воздуха и собственно флотационный процесс разделения воды и примеси. На ТЭС используются горизонтальные многокамерные и радиальные флотаторы, в которые для повышения эффективности очистки может вводиться раствор коагулянта.

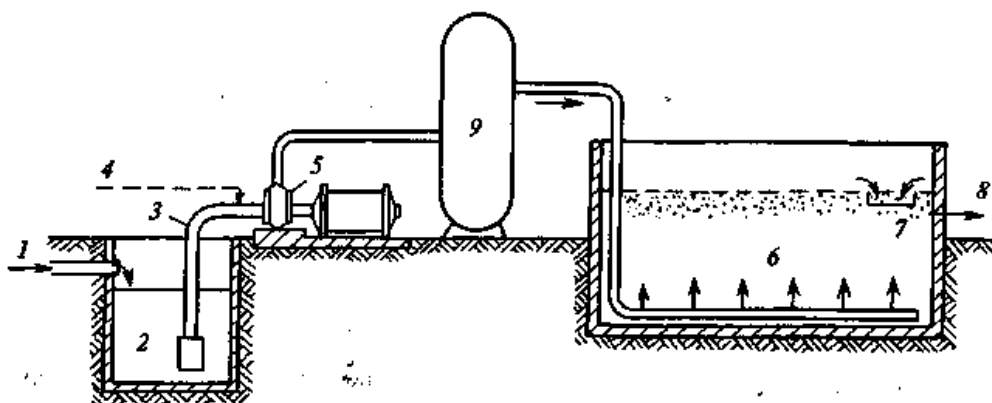


Рис. 3.9. Схема установки для напорной флотации: 1 – вход воды; 2 – приемный резервуар; 3 – всасывающая труба; 4 – воздухопровод; 5 – насос; 6 – флотационная камера; 7 – пеносорбник; 8 – отвод очищенной воды; 9 – напорная емкость

При небольших концентрациях нефтепродуктов, составляющих около $10\text{--}20 \text{ мг/дм}^3$, в комплексной схеме очистки могут отсутствовать некоторые элементы, например, крупногабаритные нефтеловушка и флотатор.

Сточные воды, содержащие $15\text{--}25 \text{ мг/л}$ нефтепродуктов после механической и физико-химической очистки, перед сбросом в водоем направляют на биохимическую очистку, которая заключается в окислении органических загрязнений микроорганизмами [30].

Биохимическую очистку проводят в аэротенках-смесителях или аэротенках с рассредоточенной подачей воды (рис. 3.10). При полной биохимической потребности в кислороде ($\text{БПК}_{\text{п}} < 250 \text{ мг/л}$) применяется одноступенчатая очистка сточных вод, при $\text{БПК}_{\text{п}} \leq 450 \text{ мг/л}$ – двухступенчатая (рис 3.11).

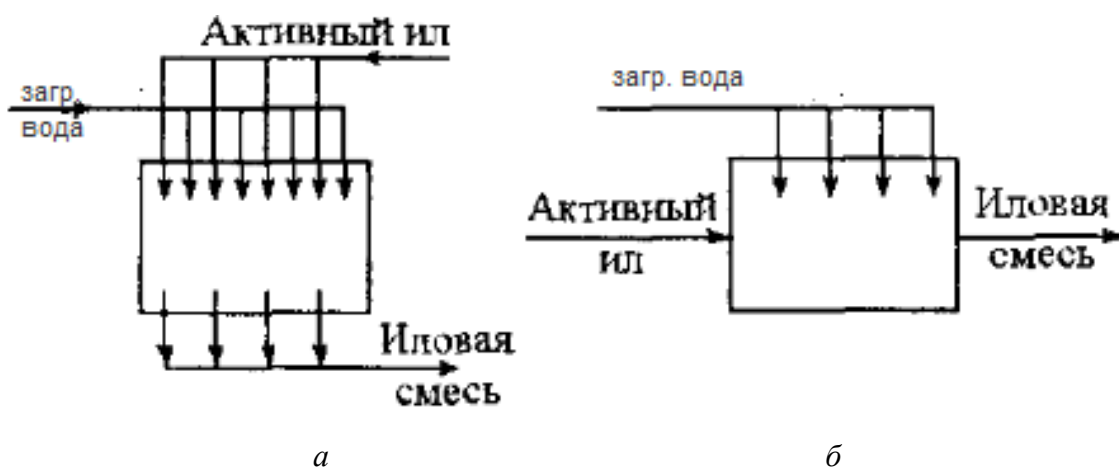


Рис. 3.10. Схемы аэротенков: *а* – аэротенк-смеситель; *б* – аэротенк с рассредоточенной подачей воды

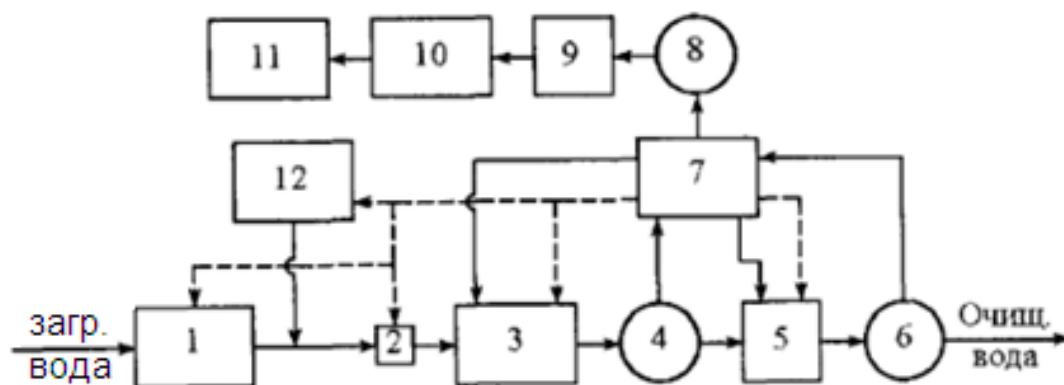


Рис. 3.11. Схема двухступенчатой биохимической очистки загрязненной нефтепродуктами воды: 1 – усреднитель; 2 – смеситель; 3 – аэротенки-смесители 1-й ступени; 4 – вторичные отстойники 1-й ступени; 5 – аэротенки 2-й ступени; 6 – вторичные отстойники 2-й ступени; 7 – насосно-воздуходувная станция; 8 – илоуплотнители; 9 – насосная станция для перекачки ила; 10 – накопитель осадка; 11 – установка для утилизации обезвоженного избыточного активного ила; 12 – реагентная установка

Аэротенки используются в чрезвычайно широком диапазоне расходов загрязненных вод от нескольких сот до миллионов кубометров в сутки.

В аэротенках-смесителях нагрузка на ил и скорость окисления загрязнений практически неизменны по длине сооружения. В аэротенках с рассредоточенной подачей воды по его длине единичные нагрузки на ил уменьшаются и становятся равномерными.

После такой очистки сточные воды имеют $\text{БПК}_{\text{II}} = 10 \div 20$ мг/л, содержат 3–5 мг/л углеводородов нефти. Степень очистки по БПК_{II} составляет 93–98 %, по нефтепродуктам – 77–86 %.

3.6. Стоки от химических очисток и консервации оборудования

Химическая очистка котлов и другого теплоэнергетического оборудования производится с помощью растворов неорганических (соляная, серная) и органических (лимонная, щавелевая, фталиевая и др.) кислот, содержащих различные ингибиторы, а также комплексонов (трилон Б и др.), композиций на основе комплексонов и с применением поверхностно-активных веществ (октадециламин и др.), используемых в концентрациях 1–50 г/дм³. При пассивации и консервации оборудования могут быть использованы аммиак, гидразин, октадециламин, трилон Б и др. Отработанные растворы помимо основных веществ содержат также соли и оксиды железа, меди, цинка, ионы кальция, магния и другие компоненты. Из этого перечня видно, что состав сбросных растворов весьма сложный, они содержат вредные химические вещества, что не допускает их сброса в природные водоемы. Технология очистки вод такого типа предусматривает их реагентную нейтрализацию, использование окислителей, бассейна-отстойника для осаждения оксидов и гидроксидов тяжелых металлов (рис. 3.12). Заканчивается обезвреживание стоков биохимическим разрушением остаточных органических соединений [8].

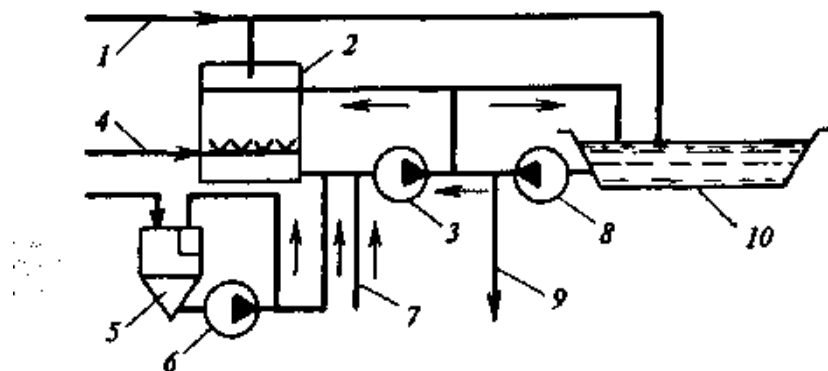


Рис. 3.12. Принципиальная схема нейтрализации и обезвреживания водот химических очисток оборудования: 1 – сброс отработанных растворов; 2 – бак-нейтрализатор; 3 – насос рециркуляции; 4 – подача сжатого воздуха; 5 – мешалка; 6 – насос для подачи окислителя; 7 – ввод реагентов; 8 – насос для перекачки; 9 – сброс обезвреженных и нейтрализованных вод; 10 – накопитель-отстойник отработанных вод

В последние годы успешно реализована попытка отказа от применения химических реагентов при очистках и консервации теплоэнергетического оборудования путем использования пароводокислородного метода очистки и пассивации.

3.7. Обмывочные воды регенеративных воздухоподогревателей мазутных котлов

Обмывочные воды РВП представляют собой кислые растворы ($\text{pH} = 1,3 \div 3$), содержащие грубодисперсные примеси: оксиды железа, кремнекислоту, продукты недожога, нерастворившуюся часть золы, свободную серную кислоту, сульфаты тяжелых металлов, соединения ванадия, никеля, меди и др.

В среднем обмывочная вода содержит: свободную кислоту (в пересчете на H_2SO_4) – от 4 до 5 г/л; железо – от 7 до 8 г/л; никель – от 0,1 до 0,15 г/л; ванадий от 0,3 до 0,8 г/л; медь – от 0,02 до 0,05 г/л; взвешенные вещества – 0,5 г/л; сухой остаток – от 32 до 45 г/л.

Сточные воды от обмывок РВП и конвективных поверхностей нагрева котлов обезвреживаются нейтрализацией их щелочами. При этом ионы тяжелых металлов осаждаются в шлам в виде соответствующих гидроксидов. Так как обмывочные воды мазутных котлов содержат ванадий, шлам, образующийся при их нейтрализации, является ценным сырьем для металлургической промышленности. Поэтому процесс нейтрализации и очистки обмывочных вод организуется так, чтобы конечными продуктами являлись обезвреженная осветленная вода и обезвоженный ванадиевый шлам, который направляется на металлургические заводы.

Нейтрализация обмывочных вод производится в одну или две стадии. При нейтрализации в одну стадию сточные воды обрабатываются известковым молоком до значения $\text{pH} = 9,5 \div 10$ и выпадения всех токсичных компонентов в осадок.

На рис. 3.13 показан разработанный ВТИ и Теплоэлектропроектом и внедренный на Киевской ТЭЦ-5 вариант схемы нейтрализации и обезвреживания обмывочных вод РВП.

Регенерация фильтра производится раствором NaCl , регенерационные воды сбрасываются в бак-нейтрализатор 2. Вода обезвреживается, однако получаемый шлам обогащен оксидами железа, сернокислым кальцием и беден соединениями ванадия (пентаоксида ванадия менее 3–5 %).

Челябинским научно-исследовательским институтом металлургии (ЧНИИМ) совместно с Киевской ТЭЦ-5 разработан метод повышения содержания ванадия в осадке. При одностадийной нейтрализации в качестве реагента-осадителя используют смесь, содержащую гидроксиды железа $\text{Fe}(\text{OH})_2$, кальция $\text{Ca}(\text{OH})_2$, магния $\text{Mg}(\text{OH})_2$ и силикат-ион SiO_3^{2-} . Процесс осаждения производится при $\text{pH} = 3,4 \text{--} 4,2$.

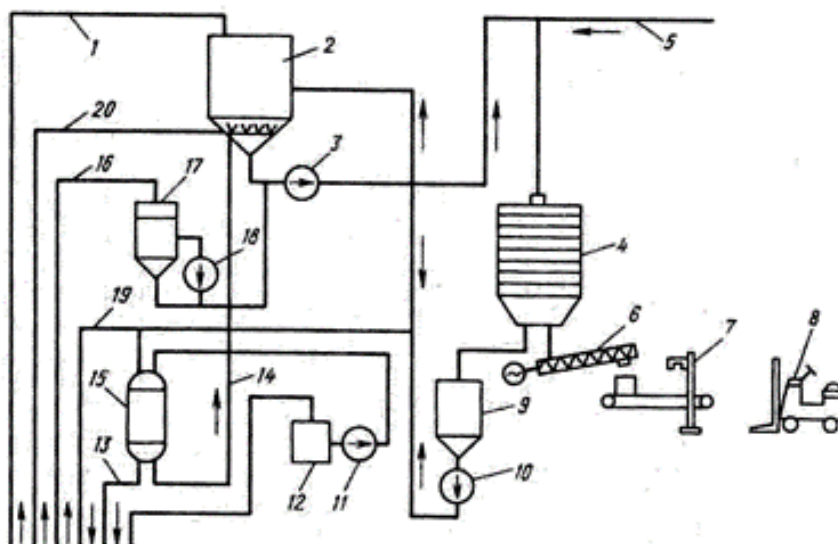


Рис. 3.13. Схема установки для обезвреживания и нейтрализации обмывочных вод котлов и РВП: 1 – обмывочная вода; 2 – бак-нейтрализатор; 3 – насос; 4 – фильтр-пресс; 5 – техническая вода на промывку фильтровальной ткани; 6 – шнековый транспортер; 7 – машина для зашивания мешков; 8 – погрузчик; 9 – бак-сборник; 10 – насос фильтрата; 11 – насос раствора соли; 12 – бак-мерник раствора соли; 13 – фильтр; 14 – регенерационный раствор; 15 – катионитный фильтр; 16 – известковое молоко; 17 – мешалка; 18 – насос; 19 – осветленная вода на повторное использование; 20 – сжатый воздух

Для повышения концентрации соединения ванадия в шламе процесс осаждения можно организовать в две стадии. На первой стадии производится обработка щелочью (NaOH) до $pH = 4,5 \div 4,0$, при котором происходит осаждение $Fe(OH)_3$ и основной массы ванадия, а на второй стадии процесс нейтрализации проводится при $pH = 8,5 \div 10$, при котором осаждаются остальные гидроксиды. Вторая стадия осуществляется известью. В этом случае ценность представляет шлам, полученный на первой стадии нейтрализации.

В этой схеме обмывочные воды подаются в бак-нейтрализатор, в который также дозируется и раствор извести. Раствор перемешивается насосами рециркуляции и сжатым воздухом, затем отстаивается в течение 7–8 ч, после чего часть осветленной воды (50–60 %) используется повторно на обмывку котлов, а шлам подается для обезвоживания на фильтр-прессы типа ФПАКМ. Шлам шнековым транспортером отправляется на расфасовку и на склад. Производительность фильтр-пресса $70 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$. Фильтрат из фильтр-пресса поступает на катионитный фильтр для улавливания остатков катионов тяжелых металлов. Фильтрат катионитных фильтров сбрасывается в водоем [8].

3.8. Поверхностные сточные воды

Качественный состав поверхностных стоков электростанций определяется интенсивностью и количеством выпадающих дождей, частотой мойки дорожных покрытий и поливочных работ, способами уборки снега. Поверхностный сток может содержать почти все компоненты, находящиеся в производственных сточных водах, однако основными загрязняющими примесями являются ГДП с размером частиц до 40 мкм, песок с размером частиц от 0,1 до 3 мм и нефтепродукты.

В целях уменьшения выноса загрязняющих веществ с поверхностными стоками необходимо иметь самостоятельную систему сбора и отведения таких стоков, которая не имела бы связи с другими системами водоотведения до очистки поверхностного стока. На ТЭС сброс загрязненной топливом воды от системы гидроуборки должен, как правило, производиться в каналы системы гидрозолоудаления. При технико-экономическом обосновании возможно использование локальной оборотной системы гидроуборки тракта топливоподачи [31].

Кроме того, необходимо предусматривать организационные мероприятия, связанные с упорядочением складирования и хранения нефтепродуктов и других реагентов; установкой бордюров, исключающих смыв грунта во время ливневых дождей; регулярной уборкой территории и ремонтом дорожных покрытий и т. п. Например, участки территории электростанций, которые в процессе эксплуатации могут быть загрязнены нефтепродуктами, должны иметь обортовку, и отвод дождевых и талых вод от них должен проектироваться в систему сточных вод, загрязненных нефтепродуктами [31]. В качестве систем очистки поверхностных стоков на ТЭС могут быть использованы отстойники с устройствами удаления осадка, дополненные фильтрами с загрузкой антрацита или активированного угля. Очищенная вода может подаваться в СОО или на другие технологические нужды вместо природной. К сожалению, схемы сбора, очистки и использования поверхностных стоков реализованы лишь на нескольких ТЭС, хотя утилизация таких стоков в масштабах отрасли может дать экономию десятков миллионов кубических метров свежей воды в год.

Для значительного и полного исключения сбросов многие станции переходят на схемы подготовки добавочной воды и очистки сточных вод при помощи установок электродиализа, обратного осмоса, ультрафильтрации и термической обработки. Наиболее рационально оценивать экономическую эффективность от исключения сбросов загрязненных солями стоков по уменьшению ущерба народному хозяйству и, соответственно, по снижению платы

за наносимый ущерб. Однако объективные методы определения величины дополнительных потерь, которые несет народное хозяйство в результате сброса загрязненных стоков, отсутствуют. Поэтому в настоящее время действует мера оценки эффективности сокращения сбросов по снижению расхода свежей воды, необходимой для разбавления стоков до содержания отдельных компонентов, соответствующих установленным нормам предельно допустимых концентраций веществ в стоках или водоемах.

Контрольные вопросы

1. Перечислите сточные воды топливно-энергетического комплекса.
2. Назовите методы очистки шахтных сточных вод.
3. Перечислите способы обеспечения требуемого уровня температуры воды в водоеме при сбросе подогретой воды прямоточной системы охлаждения.
4. Охарактеризуйте сточные воды водоподготовительных установок.
5. Назовите направления совершенствования экономичных и экологических схем ВПУ.
6. Охарактеризуйте сточные воды системы гидрозолоудаления.
7. Назовите методы очистки сточных вод, загрязненных нефтепродуктами.
8. Опишите принципиальную схему нейтрализации и обезвреживания вод от химических очисток оборудования.
9. Опишите способ очистки обмывочной воды регенеративных воздухоподогревателей мазутных котлов.
10. Охарактеризуйте поверхностные сточные воды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жизнин, С. Экологические аспекты ТЭК России / С. З. Жизнин. – Текст : электронный // Независимая газета. – 2009. – 13 мая. – URL: https://www.ng.ru/energy/2009-05-13/9_tek.html (дата обращения: 25.02.2019).
2. Баришполец, В. А. Анализ глобальных экологических проблем / В.А. Баришполец // РЭНСИТ. – 2011. – №1. – С. 79–96.
3. Иситов, Д. Т. Как загрязнение атмосферы влияет на природу / Д. Т. Иситов, О. Д. Каблукова // Молодой ученый. – 2016. – №9.1. – С. 34–35.
4. Бартновская, О. В. Воздействие отраслей топливно-энергетического комплекса на окружающую среду (на примере Канско-Ачинского ТЭК) / О. В. Бартновская // Экология Южной Сибири и сопредельных территорий : сборник трудов конференции: в 2 томах. – Абакан : Издательство Хакасского государственного университета им. Н.Ф. Катанова, 2015. – Т. 1, вып. 19. – С. 134.
5. Попутный нефтяной газ в России: «Сжигать нельзя, перерабатывать!» : аналитический доклад об экономических и экологических издержках сжигания попутного нефтяного газа в России / П. А. Кирюшин, А. Ю. Книжников, К. В. Кочи [и др]. – Москва: Всемирный фонд дикой природы (WWF), 2013. – 88 с.
6. Ветошкин, А. Г. Инженерная защита окружающей среды от вредных выбросов: учебное пособие / А. Г. Ветошкин. – Вологда: Инфра-Инженерия, 2016. – 416 с.
7. Экология: справочник. – URL: <https://ru-ecology.info/> (дата обращения: 05.02.2019). – Текст : электронный.
8. Повышение экологической безопасности ТЭС: учебное пособие для вузов / А. И. Абрамов, В. В. Шищенко, Л. С. Стерман [и др]. – Москва: Издательство МЭИ, 2001. – 378 с.
9. Комарова, Н. В. Влияние сточных вод теплоэнергетики на окружающую среду / Н. В. Комарова, Е. Р. Власова, Е. О. Реховская // Молодой ученый. – 2016. – №24. – С. 136–137.
10. Владимиров, В. А. Разливы нефти: причины, масштабы, последствия / В.А. Владимиров // Стратегия гражданской защиты: проблемы и исследования. – 2014. – № 1. – С. 217–240.
11. Кузубова, Л. И. Очистка нефтесодержащих сточных вод: аналитический обзор / Л. И. Кузубова, С.В. Морозов. – Новосибирск, 1992. – 60 с.
12. Санаев, Ю. И. Удельное электрическое сопротивление (УЭС) пыли (зола) в электрофильтрах / Ю. И. Санаев, Л. В. Чекалов. – Семibrатово : ЗАО «Кондор-Эко», 2016. – 49 с.

13. Сахаров, Е.Н. Специфика работы и конструктивные особенности слоевых топок с кипящим слоем / Е. Н. Сахаров // Новости теплоснабжения. – 2002. – № 6(22). – С. 16.

14. Калинина, А. С. Современное состояние проблем сероочистки дымовых газов тепловых электрических станций / А. С. Калинина, Д. А. Романович, А. А. Тринченко // Труды Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – Санкт-Петербург, 2013. – № 515. – С. 45–50.

15. Носков, А. С. Технологические методы защиты атмосферы от вредных выбросов на предприятиях энергетики : аналитический обзор / А. С. Носков, З. П. Пайз. – Новосибирск, 1996. – 156 с.

16. Определяющие факторы влияния на энергоёмкость. – Текст : электронный // Энергетика: история, настоящее и будущее. В 5 книгах. Книга 5. Электроэнергетика и охрана окружающей среды. Функционирование энергетики в современном мире / С. Г. Плачкова, И. В. Плачков, Н. И. Дунаевская [и др.]. – URL: <http://energetika.in.ua/ru/books/book-5/part-3/section-2/2-3> (дата обращения: 25.02.2019).

17. Впрыск воды или водомазутной эмульсии в ядро факела. – Текст : электронный // Основы современной малой энергетики, 2019. – URL: <https://msd.com.ua/osnovy-sovremennoj-maloj-energetiki/vprysk-vody-ili-vodomazutnoj-emulsii-v-yadro-fakela/> (дата обращения: 25.02.2019).

18. Гибридный СНКВ-СКВ-процесс. – Текст : электронный // Энергетика ТЭС и АЭС. – URL: <http://tesiaes.ru/?p=12595> (дата обращения: 25.02.2019).

19. Ворон, Л.В. Проблемы очистки шахтных вод / Л. В. Ворон, Л. Р. Ланге, А. М. Благоразумова // Вестник СибГИУ. – 2015. – № 2(12). – С. 76–79.

20. Образование и очистка шахтных вод. – URL: <https://www.voda.ru/articles/schahtnye-vody/sposoby-ochistki> (дата обращения: 27.02.2019). – Текст : электронный.

21. Технологические схемы очистки от взвешенных веществ и обеззараживания шахтных вод: каталог. – Пермь, 1986. – URL: pdf.standartgost.ru/catalog/Data2/1/4293751/4293751805.pdf (дата обращения: 27.02.2019). – Текст : электронный.

22. О водоснабжении и водоотведении : Федеральный закон № 416-ФЗ : принят Государственной Думой 23 ноября 2011 года : одобрен Советом Федерации 29 ноября 2011 года. – Москва : Кремль, 2011. – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_122867/ (дата обращения: 28.02.2019). – Текст : электронный.

23. Чичирова, Н.Д. Безреагентные методы обработки воды: учебное пособие / Н. Д. Чичирова, А. А. Чичиров. – Казань: КФМЭИ, 1996. – 79 с.

24. Опыт освоения новых технологий обработки воды на ТЭС / Б. М. Ларин, А. Н. Короткое, М. Ю. Опарин, А. Б. Ларин // Теплоэнергетика. – 2010. – № 8. – С. 8–13.

25. Жадан, А. В. Анализ современных технологий водоподготовки на ТЭС / А. В. Жадан, Е. Н. Бушуев, Н. А. Еремина. – Текст : электронный// Новости теплоснабжения. – 2013. – № 7(155). – URL: http://www.ntsni.ru/7_2013.html (дата обращения: 27.02.2019).

26. Сухое удаление золы: как превратить отходы в товар. – URL: http://pikabu.ru/story/sukhoe_udalenie_zolyi_kakprevratit_otkhodyi_v_tovar_5995884 (дата обращения: 27.02.2019). – Текст : электронный.

27. Черепанов, А. А. Комплексная переработка золошлаковых отходов ТЭЦ (результаты лабораторных и полупромышленных испытаний) / А. А. Черепанов, В. Т. Кардаш // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. – 2009. – № 2. – С. 98–116.

28. Очистка воды от нефтепродуктов: способы очищения стоков. – URL: <http://neftok.ru/raznoe/ochistka-stochnyh-vod-ot-nefteproduktov.html#metody-mehanicheckoj-ochistki-stokov> (дата обращения: 10.02.2019). – Текст : электронный.

29. Исследование сорбционных свойств фильтрующих материалов / Н. М. Привалова, М. В. Двадненко, А. А. Некрасова, Д. М. Привалов. – DOI 10.21515/1990-4665-126-020. – Текст : электронный // Научный журнал КубГАУ. – 2017. – №126 (02). – URL: <http://ej.kubagro.ru/2017/02/pdf/20.pdf> (дата обращения: 27.02.2019).

30. Кузубова, Л. И. Очистка нефтесодержащих сточных вод: аналитический обзор / Л. И. Кузубова, С. В. Морозов. – Новосибирск, 1992. – 72 с.

31. РД 34.42.101 (СО 153-34.42.101). Руководство по проектированию обработки и очистки производственных сточных вод тепловых электростанций : утвержден Минэнерго СССР 24 марта 1976 года. – Москва : Информэнерго, 1976. – 29 с.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
Глава 1. ВОЗДЕЙСТВИЕ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ.....	5
1.1. Экологические аспекты воздействия топливно-энергетического комплекса на атмосферу.....	5
1.2. Характеристика пылегазовых выбросов в атмосферу.....	7
1.3. Экологические аспекты воздействия топливно-энергетического комплекса на гидросферу.....	10
Глава 2. ЗАЩИТА АТМОСФЕРЫ ОТ ВЛИЯНИЯ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА.....	16
2.1. Снижение выбросов золовых частиц.....	16
2.1.1. Циклонные (инерционные) золоуловители.....	18
2.1.2. Мокрые инерционные золоуловители.....	19
2.1.3. Электрофильтры.....	21
2.1.4. Тканевые фильтры.....	28
2.2. Снижение выбросов оксидов серы.....	32
2.2.1. Очистка топлива от соединений серы до его сжигания.....	32
2.2.2. Связывание соединений серы в процессе горения.....	33
2.2.3. Очистка дымовых газов от соединений серы.....	37
2.3. Снижение выбросов оксидов азота в атмосферу.....	46
2.3.1. Первичные мероприятия, направленные на уменьшение выбросов NO_x	49
2.3.1.1. Горелки с низким выбросом NO_x	50
2.3.1.2. Ступенчатое сжигание топлива.....	51
2.3.1.3. Рециркуляция дымовых газов.....	52
2.3.1.4. Вспрыск воды или водомазутной эмульсии в ядро факела.....	53
2.3.1.5. Применение комбинаций первичных мероприятий.....	55
2.3.2. Вторичные мероприятия по уменьшению выбросов NO_x	56
2.3.2.1. Сравнительный анализ различных методов очистки дымовых газов от NO_x	56
2.3.2.2. Селективный каталитический восстановительный метод очистки дымовых газов от NO_x	59
2.3.2.3. Гибридный СНКВ-СКВ.....	66
2.3.2.4. Электронно-лучевой способ очистки дымовых газов от NO_x и SO_2	67

Глава 3. ЗАЩИТА ГИДРОСФЕРЫ ОТ ВЛИЯНИЯ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА.....	69
3.1. Очистка шахтных сточных вод	69
3.1.1. Отстаивание	69
3.1.2. Осветление	70
3.1.3. Фильтрование	71
3.1.4. Гидроциклоны	71
3.2. Сточные воды систем охлаждения ТЭС.....	72
3.3. Сточные воды водоподготовительных установок.....	74
3.4. Воды систем гидрозолоудаления	81
3.5. Стоки, загрязненные нефтепродуктами	83
3.6. Стоки от химических очисток и консервации оборудования	89
3.7. Обмывочные воды регенеративных воздухоподогревателей мазут- ных котлов	90
3.8. Поверхностные сточные воды.....	92
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	94

Учебное издание

Гайнуллина Лейсан Раисовна
Тактамышева Рушания Рифадовна

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ
В ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ

Учебное пособие

Кафедра энергообеспечения предприятий
и энергоресурсосберегающих технологий КГЭУ

Корректор И.В. Краснова
Компьютерная верстка И.В. Красновой

Подписано в печать 08.12.2020.
Формат 60×84 1/16. Гарнитура «Times New Roman».
Усл. печ. л. 5,75. Уч.-изд. л. 4,43. Заказ № 291/эл.

Редакционно-издательский отдел КГЭУ
420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51