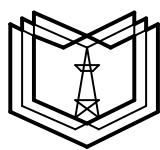


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации



КГЭУ

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

А. М. ГРИБКОВ

**НАИЛУЧШИЕ ДОСТУПНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТОПЛИВА НА ТЭС**

Учебное пособие

Казань
2022

УДК 504.064:621.311.22

ББК 31.37

Г62

Рецензенты:

д-р техн. наук, проф. ФГБОУ ВО «КГЭУ» *М. А. Таймаров*;

д-р техн. наук, проф., зам. ген. дир. по науке АО «ЭНИН» *Н. А. Зройчиков*

Г62 **Грибков, Александр Михайлович.**

Наилучшие доступные технологии при использовании топлива на ТЭС : учебное пособие / А. М. Грибков. – Казань : КГЭУ, 2022. – 219 с.

Изложены вопросы законодательства по контролю за выбросами ТЭС и по их уменьшению посредством применения новейших достижений в области эффективного использования топлива на ТЭС. Рассмотрены перспективные способы сжигания топлива и очистки продуктов его сгорания.

Предназначено для обучающихся по образовательной программе направления подготовки 13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника, направленность (профиль) «Технология производства электрической и тепловой энергии».

УДК 504.064:621.311.22

ББК 31.37

© Грибков А. М., 2022

© КГЭУ, 2022

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время предлагаются различные пути решения проблемы загрязнения атмосферного воздуха. Самое кардинальное из них – движение за добровольное исчезновение человечества путём отказа от размножения. При этом считается, что для биосферы Земли будет лучше, если человечество не будет существовать. Сторонники этого движения считают, что человеческая раса – это захватчик, популяция которого вышла из-под природного контроля, и является угрозой планете Земля и населяющим ее живым существам. И только полное исчезновение людей как вида восстановит гармонию природы. Члены этого движения отказываются иметь детей, а наиболее активные из них делают себе операции, приводящие к половому бесплодию [1].

Другие предложения, наоборот, направлены на создание более благоприятных условий для жизни людей. Так, например, в Англии еще в 1273 г. был принят закон, направленный на обеспечение снижения уровня загрязнения воздуха, вызванного сжиганием бурого угля. В 1300 г. королевским указом было запрещено жечь уголь в Лондоне. Король Эдуард I под страхом смертной казни запретил использовать в качестве топлива уголь.

Муниципалитет г. Глазго, являвшегося лидером промышленного развития в Англии, сделал первые шаги, направленные на уменьшение вредного воздействия дыма, и разработал специальное постановление, которое было принято в 1827 г. В постановлении говорилось следующее:

«1. Высота и размеры заводских дымоходов должны быть не менее 15 м.

2. Форма или относительные размеры каминов, печей и дымоходов должны быть таковы, чтобы они по возможности полностью сжигали топливо.

3. Рабочие должны время от времени подбрасывать в печь топливо, чтобы обеспечивать полное сгорание и истребление дыма, тем самым предотвращая его вредное воздействие».

В 1892 г. в Глазго вступило в силу еще одно специальное постановление по борьбе с дымом. Ответственность за его исполнение была возложена на прокурора, которому вменялось в обязанность следить за применением наиболее эффективных средств, способствующих полному сгоранию топлива в печах.

С 1905 г. в Англии были начаты натурные замеры содержания вредных веществ в осадках, а затем и в воздухе путем пропускания его через фильтры.

В 1922 г. было принято постановление, в соответствии с которым выделение густого дыма в течение двух минут или более при наблюдении длительностью до одного часа было достаточным основанием для привлечения виновных к суду [2].

В декабре 1952 г. в Лондоне стояла безветренная погода, над городом образовался слой смога, который держался четверо суток. В результате погибло около 12 000 человек, большую часть из которых составляли младенцы, престарелые люди и страдающие респираторными заболеваниями. Более 100 000 человек заболели. После вступления в силу постановления 1956 г. об очистке воздуха на промышленных предприятиях Англии началась повсеместная установка бездымного оборудования. Инспекторы, наблюдая за заводским районом с высокого здания, могли сразу определить место, где нарушался закон. В результате за период с 1960 по 1970 гг. уровень загрязнения воздуха был снижен в два раза.

В США еще в 1880 г. густой дым был объявлен нарушением общественного порядка и за него причитался штраф от 5 до 50 долларов. Однако реальные попытки снизить степень загрязнения атмосферы были предприняты там лишь в 40-х гг. двадцатого столетия ввиду ухудшающихся условий в котловине Лос-Анджелеса и периодически повторяющихся там смогов. Ближе к середине 70-х гг. была создана основа федерального законодательства США в области контроля загрязнения атмосферы. По мере экономического развития действующие правила по необходимости изменялись.

Мероприятия по охране атмосферного воздуха в России были записаны во Врачебном уставе и в Уставе промышленном и строительном. Во врачебном уставе записано, что полиция должна наблюдать, чтобы на дорогах, улицах, на мостах и рядом с ними не было ничего, что могло бы заражать воздух. В Строительном уставе строительство предприятий, наносящих вред чистоте воздуха, в городах и выше городов по течению рек запрещается.

В 1833 г. в России было издано положение «О разрешении и устройстве частных заводов, мануфактур, фабричных и других заведений в г. Санкт-Петербурге».

В 1913 г. в Государственную думу Управлением Главного врачебного инспектора при Министерстве внутренних дел был внесен законопроект «О санитарной охране воздуха, воды и почвы», а также «Положение о санитарной охране воздуха от загрязнения дымом», которые однако не успели принять в связи с началом Первой мировой войны.

В 1918 г. был создан Народный Комиссариат здравоохранения РСФСР, который подготовил свыше 100 декретов. В 1920 г. было издано постановление Народного комиссариата труда об охране населенных мест от вредного влияния промышленности, согласно которому для строительства предприятий выделялись специальные территории [3].

В 1924 г. на базе Главной физической обсерватории (ГФО) была создана Главная геофизическая обсерватория (ГГО). С момента своего основания и до образования в 1929 г. Гидрометеорологического комитета СССР, ГГО выполняла функции руководящего органа Гидрометеорологической службы России. В 1942 г. в состав Главной геофизической обсерватории вошел Ленинградский институт экспериментальной метеорологии (ЛИЭМ). В середине 1960-х годов в ГГО под руководством М. Е. Берлянда начали проводиться исследования по атмосферной диффузии и загрязнению атмосферы.

С 1929 г. в СССР были начаты натурные исследования по гигиене атмосферного воздуха. Полученные данные использовались при размещении промышленных предприятий и организации санитарно-защитных зон. Для снижения промышленных выбросов был создан трест «Газоочистка», включавший научно-исследовательский («НИИОГаз») и проектный («Гипрогазоочистка») институты. В 1937 г. СНК СССР принял постановление «Об устройстве дымоуловителей на электростанциях г. Москвы».

В 1949 г. Совет Министров СССР принял постановление «О мерах борьбы с загрязнением атмосферного воздуха и об улучшении санитарно-гигиенических условий населенных мест», в соответствии с которым на электростанциях, сжигающих твердое топливо должны устанавливаться золопылеулавливающие установки. Ввод новых предприятий, сжигающих топливо, требовал разрешения созданной Государственной санитарной инспекции СССР.

В 1947 г. был издан ГОСТ 1324-47 «Промышленные предприятия. Санитарные нормы и правила проектирования», который периодически пересматривался и переиздавался. В 1975 г. Государственным комитетом СССР по делам строительства были изданы Строительные нормы и правила для тепловых электростанций (СНиП II-58-75), а в 1986 г. Государственным комитетом СССР по гидрометеорологии и контролю природной среды (ГОСКМГИДРОМЕТ) был издан общесоюзный нормативный документ (ОНД-86) по методике расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий (РД 52.04.212-86) [4], основные положения которого действуют и сейчас.

В настоящее время применяется два основных подхода при борьбе с загрязнением атмосферного воздуха. Первый, получивший название «наилучших практически достижимых мер» (*the best practicable means*), состоит в том, что независимо от степени загрязнения атмосферного воздуха в населенных местах внедряются наилучшие технологические меры борьбы с загрязнением, достижимые на современном уровне развития техники.

Второй подход называется «управление качеством воздуха» (*air quality management*) и предполагает наличие стандартов качества воздуха, для обеспечения которого выполняются необходимые мероприятия, вплоть до ограничения мощности предприятий.

При таком подходе основным нормативом является предельно допустимая концентрация (ПДК), а использование предельно допустимых выбросов (ПДВ), рассчитанных из условия непревышения ПДК для каждого конкретного предприятия, только облегчает выполнение основного критерия.

В результате первого подхода получившиеся приземные концентрации могут оказаться как ниже, так и выше допустимых. Если концентрации получились заметно меньше допустимых, можно найти район, где средства, израсходованные на их обеспечение, пригодились бы в районе с высокими приземными концентрациями и принесли бы гораздо большую пользу. Поэтому такой подход считался для СССР «абсолютно неприемлемым» [3]. Однако в настоящее время приоритеты меняются и в рамках перехода на наилучшие доступные технологии (НДТ) он становится основным.

Целью данного издания является оказание помощи студентам при изучении дисциплин, в которых рассматриваются вопросы эксплуатации основного и вспомогательного оборудования ТЭС с учетом их воздействия на воздушный бассейн, а также при выполнении выпускной квалификационной работы. Оно будет полезно при самостоятельной работе студентов по дисциплинам «Технология производства электрической и тепловой энергии» (разделы: «Технические расчеты по проектам, функционально-стоимостной анализ эффективности проектных решений», «Выбор параметров современных энергоблоков», «Влияние системных факторов на профиль энергоблоков») и «Наилучшие доступные технологии» (разделы: «Выбросы тепловых электростанций в атмосферу и их уменьшение», «Распространение выбросов ТЭС в атмосфере», «Контроль загрязнения воздуха», «Перспективные методы использования топлива»).

Материал, представленный в учебном пособии, направлен на формирование у студентов следующих компетенций:

- способность планировать и ставить задачи исследования, выбирать методы экспериментальной работы на объектах по производству электрической и тепловой энергии;

- способность собирать научно-техническую информацию, проводить технико-экономический и функционально-стоимостный анализ эффективности проектных решений для расчета параметров и выбора серийного и разработки нового теплоэнергетического, теплотехнического и теплотехнологического оборудования.

1. ЗАКОНОДАТЕЛЬСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ОБ ОХРАНЕ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

1.1. Основные тенденции в изменении законодательства Российской Федерации об охране окружающей среды

С 2012 г. стали меняться некоторые приоритеты в работе Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации (Минприроды РФ). Эти изменения были зафиксированы в Федеральном законе РФ [5]. Если ранее, еще со времен СССР, в основе работы министерства лежала задача обеспечения приземных концентраций, создаваемых выбросами промышленным предприятием не выше допустимых, независимо от установленного оборудования, то сейчас главным стало применение оборудования, соответствующего мировым стандартам по экологическим характеристикам. При этом задача обеспечения нормативов по загрязнению приземного слоя воздуха остается. Однако юридически возможным становится вариант, когда придется закупать и устанавливать дорогостоящее оборудование даже там, где приземные концентрации и при несколько менее экологичном, но более дешевом отечественном оборудовании тоже будут меньше допустимых. При этом перерасходованные средства могли бы быть более эффективно использованы в районах с повышенными приземными концентрациями вредных выбросов.

Принципиальным является и замена понятия «наилучшая существующая технология» на «наилучшая доступная технология». Информация о выбросах теперь может быть объявлена «коммерческой тайной».

Изменено понятие допустимого выброса: если раньше этот выброс должен был обеспечить экологические нормативы качества атмосферного воздуха с учетом фоновое загрязнение, то теперь он должен обеспечить выполнение требований в области охраны атмосферного воздуха, т. е. воли чиновника.

1.1.1. Обзор изменений Федерального закона «Об охране окружающей среды» [5]

Уточнено понятие допустимых выбросов как выбросов в атмосферный воздух и допустимых сбросов как сбросов в водные объекты.

Понятие субъекта хозяйственной и иной деятельности заменено юридическим лицом или индивидуальным предпринимателем.

Понятие наилучшая существующая технология заменено на наилучшая доступная технология – технология, определяемая на основе современных достижений науки и техники при условии наличия технической возможности ее применения.

Введено понятие «комплексное экологическое разрешение» – документ, который выдается юридическому лицу или индивидуальному предпринимателю, осуществляющему деятельность на объекте, оказывающем негативное воздействие на окружающую среду, и содержит требования в области охраны окружающей среды.

Устанавливается обязательность финансирования юридическими лицами и индивидуальными предпринимателями, осуществляющими деятельность, которая может привести к загрязнению окружающей среды, мер по уменьшению этого негативного воздействия.

Дано более общее понятие объектов охраны окружающей среды как компонентов природной среды, природных объектов и природных комплексов.

Все объекты, оказывающие негативное воздействие на окружающую среду, подразделяются на четыре категории:

- объекты I категории – это те, которые оказывают значительное негативное воздействие на окружающую среду и относятся к областям применения наилучших доступных технологий;

- объекты II категории – это те, которые оказывают умеренное негативное воздействие на окружающую среду;

- объекты III категории – это те, которые оказывают незначительное негативное воздействие на окружающую среду;

- объекты IV категории – это те, которые оказывают минимальное негативное воздействие на окружающую среду.

Критерии, на основании которых осуществляется отнесение объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду, к объектам I, II, III и IV категорий, устанавливаются Правительством Российской Федерации.

Присвоение объекту, оказывающему негативное воздействие на окружающую среду, соответствующей категории осуществляется при его постановке на государственный учет. Категория объекта может быть изменена при изменении учетных сведений об объекте

Понятие «государственный экологический надзор» заменено на «федеральный государственный экологический надзор».

В полномочия органов государственной власти РФ в сфере отношений, связанных с охраной окружающей среды добавлено:

1) утверждение правил исчисления и взимания платы за негативное воздействие на окружающую среду, осуществление контроля за своевременностью ее внесения;

2) установление:

– перечней загрязняющих веществ и областей применения наилучших доступных технологий;

– порядка разработки справочников по наилучшим доступным технологиям и выдачи комплексных экологических разрешений;

– критериев, на основании которых осуществляется присвоение объектам, оказывающим негативное воздействие на окружающую среду, соответствующих категорий.

Установлено, что плата за негативное воздействие на окружающую среду подлежит зачислению в бюджеты бюджетной системы РФ. Внесение данной платы не освобождает лиц, обязанных вносить эту плату, от осуществления мер по снижению негативного воздействия на окружающую среду.

Плату за негативное воздействие на окружающую среду обязаны вносить юридические лица и индивидуальные предприниматели, осуществляющие деятельность на территории Российской Федерации, ее континентальном шельфе и в ее исключительной экономической зоне на всех объектах, кроме объектов IV категории.

Установлено, что платежной базой для исчисления платы за негативное воздействие на окружающую среду является объем или масса выбросов загрязняющих веществ, которая определяется лицами, обязанными вносить плату самостоятельно на основе данных производственного экологического контроля.

Информация о платежной базе представляется за отчетный период лицами, обязанными вносить плату, администратору доходов бюджетов бюджетной системы Российской Федерации.

Для территорий, подлежащих особой охране, при расчете платежей за выбросы применяются дополнительные повышающие коэффициенты.

В целях стимулирования юридических лиц и индивидуальных предпринимателей к мерам по снижению негативного воздействия на окружающую среду и внедрению наилучших доступных технологий при исчислении платы применяются следующие коэффициенты:

– коэффициент 0 – за выбросы в пределах технологических нормативов после внедрения наилучших доступных технологий;

- коэффициент 1 – за выбросы загрязняющих веществ в пределах нормативов допустимых выбросов;
- коэффициент 25 – за выбросы загрязняющих веществ в пределах временно разрешенных выбросов;
- коэффициент 100 – за выбросы загрязняющих веществ, превышающих установленные для объектов I категории, а также за превышающие указанные в декларации выбросы о воздействии на окружающую среду для объектов II категории.

При исчислении платы на объектах III категории, объем или масса выбросов загрязняющих веществ, указанные в отчете, признаются осуществляемыми в пределах нормативов допустимых выбросов за исключением радиоактивных веществ, высокотоксичных веществ, веществ, обладающих канцерогенными, мутагенными свойствами (веществ I и II класса опасности).

В случае несоблюдения снижения выбросов загрязняющих веществ в течение шести месяцев после наступления сроков, определенных планом, нормативы допустимых сбросов или технологические нормативы подлежат пересчету с применением коэффициента 100.

Из суммы платы за негативное воздействие на окружающую среду вычитаются затраты на реализацию мероприятий по снижению негативного воздействия на окружающую среду.

Плата за выбросы загрязняющих веществ вносится по месту нахождения стационарного источника.

Отчетным периодом в отношении внесения платы за негативное воздействие на окружающую среду признается календарный год.

Плата, исчисленная по итогам отчетного периода, вносится не позднее 1-го марта года, следующего за отчетным периодом.

Несвоевременное или неполное внесение платы влечет за собой уплату пеней в размере одной трехсотой ставки рефинансирования центрального банка Российской Федерации, действующей на день уплаты пеней, но не более чем в размере двух десятых процента за каждый день просрочки.

Излишне уплаченные суммы платы за негативное воздействие на окружающую среду подлежат возврату или зачету в счет будущего отчетного периода.

К мерам государственной поддержки деятельности в целях охраны окружающей среды относятся:

- инвестиции на внедрение наилучших доступных технологий и реализацию иных мер по снижению негативного воздействия на окружающую среду;

– содействие в осуществлении образовательной деятельности в области охраны окружающей среды и информационная поддержка мероприятий по снижению негативного воздействия на окружающую среду;

– разработка новых методов контроля за загрязнением окружающей среды.

Государственная поддержка осуществляется предоставлением налоговых льгот и льгот в отношении платы за негативное воздействие на окружающую среду, а также путем выделения бюджетных средств.

Государство оказывает поддержку при внедрении наилучших доступных технологий, сооружении установок по улавливанию выбрасываемых загрязняющих веществ и очистке газов перед их выбросом в атмосферный воздух, создании автоматизированных систем и лабораторий по контролю за составом загрязняющих веществ и объемом или массой их выбросов в атмосферный воздух, автоматизированных систем и лабораторий по наблюдению за состоянием окружающей среды, в том числе компонентов природной среды.

В явном виде сказано, что нормативы в области охраны окружающей среды могут пересматриваться на основании научно-исследовательских работ и с учетом экологических, социальных, экономических последствий и не обязательно в сторону ужесточения.

Основным нормативом качества окружающей среды остаются предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ как в воздухе, так и в воде.

Впервые установлены следующие нормативы допустимого воздействия на окружающую среду:

– допустимые выбросы (технический норматив);

– допустимые концентрации вредных веществ в выбросах (технологический норматив) не обязаны обеспечивать нормативы качества окружающей среды (ст. 21, п. 2, [5]): «п. 2. Соблюдение нормативов допустимого воздействия на окружающую среду, за исключением технологических нормативов и технических нормативов, должно обеспечивать соблюдение нормативов качества окружающей среды».

Нормативы допустимых выбросов определяются расчетным путем на основе нормативов качества окружающей среды (но обеспечивать их не обязаны), в том числе нормативов предельно допустимых концентраций, с учетом фоновое состояние компонентов природной среды.

Впервые сказано, что расчет нормативов допустимых выбросов производится самими владельцами предприятий, и только для объектов I и II категорий. Но при этом должны использоваться методики, утвержденные уполномоченными органами исполнительной власти.

Для объектов III категории нормативы допустимых выбросов рассчитываются только для веществ I и II классов опасности.

Для объектов IV категории нормативы допустимых выбросов не рассчитываются.

Технологические нормативы устанавливаются комплексным экологическим разрешением на основе технологических показателей, не превышающих технологических показателей наилучших доступных технологий. Последние, в свою очередь, устанавливаются на основе информационно-технических справочников по наилучшим доступным технологиям не позднее шести месяцев после их опубликования.

При невозможности соблюдения нормативов допустимых выбросов устанавливаются временно разрешенные выбросы.

Временно разрешенные выбросы устанавливаются на период достижения установленных нормативов допустимых выбросов и технологических нормативов.

Если временно разрешенные выбросы установлены на период до вывода объекта из эксплуатации, разработка программ повышения экологической эффективности не требуется.

Лица, осуществляющие хозяйственную деятельность на объектах I категории, обязаны получить комплексное экологическое разрешение.

Комплексное экологическое разрешение выдается на отдельный объект, в том числе на линейный.

В заявке на получение комплексного экологического разрешения указывают:

- наименование предприятия;
- паспортные данные предпринимателя;
- код объекта;
- вид основной деятельности;
- виды и объем производимой продукции;
- информацию об использовании сырья, воды, электрической и тепловой энергии;
- сведения об авариях и инцидентах, повлекших за собой негативное воздействие на окружающую среду и произошедших за предыдущие семь лет;

- информацию о реализации программы повышения экологической эффективности (при ее наличии);
- расчеты технологических нормативов и нормативов допустимых выбросов;
- обоснование лимитов на размещение отходов производства и потребления;
- проект программы производственного экологического контроля;
- информацию о наличии положительного заключения государственной экологической экспертизы в случае ее необходимости.

При невозможности соблюдения технологических нормативов и нормативов допустимых выбросов к заявке на получение комплексного экологического разрешения дополнительно прилагаются:

- проект программы повышения экологической эффективности;
- планируемые временно разрешенные выбросы на текущий момент и на период реализации программы повышения экологической эффективности, а также после ее реализации.

Заявка на получение комплексного экологического разрешения подается не позднее чем за два месяца до ввода объекта в эксплуатацию или за четыре месяца до истечения срока действия уже имеющегося комплексного экологического разрешения.

Орган исполнительной власти, осуществляющий выдачу комплексного экологического разрешения, размещает заявку на получение комплексного экологического разрешения на официальном сайте указанного органа в сети «Интернет», со свободным доступом к нему.

Решение о выдаче комплексного экологического разрешения или об отказе в его выдаче принимается в месячный срок.

Комплексное экологическое разрешение содержит:

- технологические нормативы;
- нормативы допустимых выбросов и физических воздействий;
- лимиты на размещение отходов производства и потребления;
- требования к обращению с отходами производства и потребления;
- согласованную программу производственного экологического контроля;
- срок действия комплексного экологического разрешения.

Комплексное экологическое разрешение может содержать временно разрешенные выбросы. В этом случае должна быть согласована программа повышения экологической эффективности.

Комплексное экологическое разрешение выдается сроком на семь лет и продлевается на тот же срок.

Комплексное экологическое разрешение подлежит пересмотру в случаях изменения технологических процессов, повлекших за собой изменение установленных объема или массы выбросов загрязняющих веществ.

Пересмотр комплексного экологического разрешения осуществляется по инициативе его владельца.

В случае изменения идентификационных характеристик владельца комплексное экологическое разрешение подлежит переоформлению одновременно с обновлением учетных сведений об объекте, оказывающем негативное воздействие на окружающую среду.

Комплексное экологическое разрешение подлежит отзыву в случае нарушения в течение шести месяцев и более установленных комплексным экологическим разрешением обязательных требований.

Владельцы комплексного экологического разрешения для объектов II категории представляют декларацию о воздействии на окружающую среду.

В декларации о воздействии на окружающую среду указывают следующие сведения:

- наименование, организационно-правовую форму и адрес юридического лица или фамилию, имя, отчество (при наличии), место жительства индивидуального предпринимателя;
- код объекта, оказывающего негативное воздействие на окружающую среду;
- вид основной деятельности;
- виды и объем производимой продукции;
- информацию о реализации природоохранных мероприятий;
- данные об авариях и инцидентах, повлекших за собой негативное воздействие на окружающую среду и произошедших за предыдущие семь лет;
- декларируемые объем или масса выбросов, сбросов загрязняющих веществ, образующихся и размещаемых отходов;
- информацию о программе производственного экологического контроля.

К декларации о воздействии на окружающую среду должны прилагаться расчеты нормативов допустимых выбросов. Представляется декларация один раз в семь лет при условии неизменности технологических процессов.

Для объектов I, III и IV категорий представление декларации о воздействии на окружающую среду не требуется.

Сделаны важные уточнения, что при сооружении объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду, вместо «наилучших существующих» технологий должны применяться «наилучшие доступные технологии».

Если на объекте капитального строительства, отнесенном к области применения наилучших доступных технологий, превышаются технологические показатели наилучших доступных технологий, то выдача разрешения на ввод объекта капитального строительства не допускается.

Федеральному государственному экологическому надзору подлежат только те объекты, которые включены в перечень, составляемый по критериям Правительства РФ.

Объекты, не включенные в перечень Правительства РФ, подлежат экологическому надзору субъектов РФ.

На объектах IV категории плановые экологические проверки не проводятся.

Юридические лица и индивидуальные предприниматели, осуществляющие деятельность на объектах I, II и III категорий, разрабатывают и утверждают программу производственного экологического контроля.

Программа производственного экологического контроля должна содержать информацию:

- об инвентаризации выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух и их источниках;
- о подразделениях и должностных лицах, отвечающих за осуществление производственного экологического контроля;
- о собственных и привлекаемых испытательных лабораториях, аккредитованных в национальной системе аккредитации;
- о периодичности и методах осуществления производственного экологического контроля, местах отбора проб и методиках измерений.

В результате производственного экологического контроля должны быть получены следующие сведения:

- о технологических процессах;
- о фактических объеме или массе выбросов загрязняющих веществ, об уровнях физического воздействия и о методиках их измерений;
- о состоянии окружающей среды, местах отбора проб и методиках измерений ее состояния.

На объектах I категории стационарные источники должны быть оснащены автоматическими средствами измерения и учета показателей выбросов вредных (загрязняющих) веществ, а также техническими средствами фиксации и передачи информации о показателях выбросов

вредных (загрязняющих) веществ в государственный реестр объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду.

В случае невозможности соблюдения нормативов допустимых выбросов на объектах II и III категорий, на период поэтапного достижения нормативов допустимых выбросов разрабатывается и утверждается план мероприятий по охране окружающей среды. План мероприятий по охране окружающей среды включает в себя перечень мероприятий по снижению негативного воздействия на окружающую среду, сроки их выполнения, объем и источники финансирования, перечень ответственных за их выполнение должностных лиц.

В случае невозможности соблюдения нормативов допустимых выбросов на объектах I категории на период поэтапного достижения нормативов допустимых выбросов и технологических нормативов разрабатывается и утверждается программа повышения экологической эффективности. Программа повышения экологической эффективности включает в себя перечень мероприятий по реконструкции и техническому перевооружению объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду, сроки их выполнения, объем и источники финансирования, перечень ответственных за их выполнение должностных лиц.

Срок реализации плана мероприятий по охране окружающей среды не может превышать семь лет и не подлежит продлению.

Для объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду, численность работников на которых составляет не менее чем 25 % численности работающего населения соответствующего населенного пункта, а также для тех, продукция которых имеет стратегическое значение для обеспечения безопасности государства, срок реализации программы повышения экологической эффективности не может превышать четырнадцать лет и не подлежит продлению.

Максимальный срок рассмотрения программы повышения экологической эффективности составляет четыре месяца и может быть продлен по обращению заявителя, но не более чем на два месяца.

Юридические лица и индивидуальные предприниматели ежегодно представляют отчет о выполнении плана мероприятий по охране окружающей среды или программы повышения экологической эффективности.

Конкретизированы цели государственного учета объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду. Вместо регулирования и планирования целью является получение достоверной

информации об этих объектах, определение областей применения наилучших доступных технологий, планирование осуществления государственного экологического надзора.

Государственный учет объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду, осуществляется в форме ведения государственного реестра объектов, который представляет собой государственную информационную систему, которая в настоящее время обновляется.

Государственный реестр объектов включает в себя:

- наименование и адрес объекта, фамилию, имя, отчество индивидуального предпринимателя;
- сведения о фактическом месте нахождения и категории объекта;
- сведения о виде хозяйственной деятельности, об объеме производимой продукции;
- сведения о наличии заключения государственной экологической экспертизы;
- сведения о стационарных источниках и объеме или о массе выбросов;
- сведения о декларациях о плате за негативное воздействие на окружающую среду;
- сведения о комплексных экологических разрешениях или декларациях о воздействии на окружающую среду;
- сведения о программе производственного экологического контроля;
- сведения о мероприятиях по снижению негативного воздействия на окружающую среду;
- информацию о применяемых на объектах I категории технологиях и об их соответствии наилучшим доступным технологиям;
- информацию о технических средствах по обезвреживанию выбросов;
- сведения о результатах осуществления государственного экологического надзора;
- информацию о консервации, ликвидации объекта, оказывающего негативное воздействие на окружающую среду, об изменении его места нахождения, о замене юридического лица или индивидуального предпринимателя.

Сопоставимость сведений, содержащихся в государственном реестре объектов, обеспечиваются за счет использования кодов объектов, идентификационных номеров налогоплательщиков, общероссийских классификаторов технико-экономической и социальной информации.

Кодом объекта является уникальный номер, не повторяющийся во времени, присвоенный объекту, оказывающему негативное воздействие на окружающую среду, при осуществлении государственного учета объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду, и подлежащий сохранению до ликвидации данного объекта.

Государственный реестр объектов состоит из федерального государственного реестра объектов и региональных государственных реестров объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду.

Ведение государственных реестров объектов, подлежащих государственному экологическому надзору, осуществляется органами исполнительной власти.

Доступ должностных лиц органов исполнительной власти к внесению сведений в государственный реестр объектов осуществляется с использованием единой системы идентификации и аутентификации (проверки подлинности).

Информация об уровнях выбросов загрязняющих веществ, содержащаяся в государственном реестре объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду, является открытой для ознакомления, за исключением информации, составляющей государственную или коммерческую тайну.

Порядок создания и ведения государственного реестра объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду, устанавливается Правительством Российской Федерации.

Лицам, осуществляющим деятельность на объектах, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду, выдается свидетельство о постановке на государственный учет объектов, об актуализации учетных сведений об объекте, о снятии с государственного учета объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду.

Объекты, оказывающие негативное воздействие на окружающую среду, подлежат постановке на государственный учет.

Постановка на государственный учет осуществляется на основании заявки о постановке на государственный учет, которая подается не позднее чем в течение шести месяцев со дня начала эксплуатации указанных объектов.

Форма заявки о постановке на государственный учет, содержащей те же сведения, что и в государственном реестре объектов, в том числе в форме электронных документов.

Орган исполнительной власти в течение десяти дней со дня получения заявки обязан осуществить постановку на государственный учет объекта, оказывающего негативное воздействие на окружающую среду, с присвоением ему кода и категории и выдать юридическому лицу или индивидуальному предпринимателю свидетельство о постановке на государственный учет этого объекта.

Порядок формирования кодов объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду, и их присвоения соответствующим объектам устанавливается федеральным органом исполнительной власти.

Сведения об объектах, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду, подлежат актуализации (уточнению):

- при замене юридического лица или индивидуального предпринимателя, реорганизации юридического лица в форме преобразования, изменении его наименования, адреса, а также фамилии, имени, места жительства индивидуального предпринимателя, реквизитов документа, удостоверяющего его личность;

- в связи с изменением места нахождения объекта, оказывающего негативное воздействие на окружающую среду;

- при изменении характеристик технологических процессов основных производств, источников загрязнения окружающей среды;

- при изменении характеристик технических средств по обезвреживанию выбросов, сбросов загрязняющих веществ, технологий использования, обезвреживания и размещения отходов производства и потребления.

Эти сведения представляются в срок не позднее чем через тридцать дней со дня государственной регистрации таких изменений и подтверждаются документами.

При актуализации учетных сведений в срок не более чем десять рабочих дней со дня подачи документов выдается свидетельство об актуализации.

Снятие с государственного учета объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду, осуществляется по месту постановки их на учет в связи с представлением сведений о прекращении деятельности.

Документом, подтверждающим прекращение деятельности на объекте, оказывающем негативное воздействие на окружающую среду, является акт о его консервации или ликвидации.

При снятии с государственного учета выдается свидетельство о снятии с государственного учета объекта, оказывающего негативное воздействие на окружающую среду, в срок не более чем десять рабочих дней со дня подачи соответствующих сведений и документов.

Орган исполнительной власти, осуществляющий ведение государственного учета объектов, самостоятельно запрашивает с использованием системы межведомственного электронного взаимодействия необходимые ему документы. Но юридические лица или индивидуальные предприниматели вправе представить указанные документы по собственной инициативе.

1.1.2. Обзор изменений Федерального закона «Об охране атмосферного воздуха» [6]

Уточнено понятие технического норматива выбросов:

- если раньше он определялся только в массовых выбросах, теперь допускается его определение и в объемных выбросах;
- дано более общее понятие выбросов вредных веществ как химических веществ либо их смесей.

Вместо технических нормативов выбросов мерой экологической безопасности теперь являются технологические нормативы выбросов. Под технологическими нормативами выбросов понимаются удельные выбросы вредных веществ в атмосферу от производств с применением наилучших доступных технологий. Наиболее общим технологическим нормативом для ТЭС являются допустимые концентрации вредных примесей в продуктах сгорания.

Изменено понятие «допустимый выброс». Если раньше этот выброс должен был обеспечить экологические нормативы качества атмосферного воздуха с учетом фоновое загрязнение, то теперь он должен обеспечить выполнение требований в области охраны атмосферного воздуха.

Введено понятие «временно разрешенный выброс» как показателя, устанавливаемого для действующего стационарного источника на период поэтапного достижения предельно допустимого выброса или технологического норматива выброса.

Введено понятие «технологический показатель выброса» – показатель концентрации вредного вещества, объема или массы выброса вредного вещества в атмосферный воздух в расчете на единицу времени или единицу произведенной продукции.

Введено понятие «технический норматив выброса» – норматив выброса вредного вещества в атмосферный воздух в расчете на единицу пробега транспортного средства или единицу произведенной работы двигателя передвижного источника.

Введено понятие «источники выбросов» как сооружений, технических устройств, оборудования, которые выделяют в атмосферный воздух вредные (загрязняющие) вещества, т. е. источников антропогенного происхождения.

Введено понятие «стационарный источник выбросов» – источник выброса, местоположение которого определено с применением единой государственной системы координат или который может быть перемещен посредством передвижного источника.

Введено понятие «передвижной источник выброса» – транспортное средство, двигатель которого при его работе является источником выброса.

Введено понятие «установка очистки газа» – сооружение, оборудование, аппаратура, используемые для очистки выбросов вредных веществ в атмосферный воздух.

В явном виде упоминаются радиоактивные выбросы.

Уточнено понятие «предельно допустимый выброс»:

- формулировка «вредное вещество» уточняется как химическое вещество, микроорганизмы или иное вещество или радиация;
- выброс, при котором обеспечивается выполнение требований в области охраны атмосферного воздуха.

Понятие «временно согласованный выброс» заменено на «временно разрешенный выброс». При этом временно разрешенный выброс устанавливается на период достижения предельно допустимого выброса, или технологического норматива выбросов, который может быть выше предельно допустимого.

Из полномочий органов государственной власти РФ в области охраны атмосферного воздуха исключено установление порядка:

- государственного учета выбросов вредных веществ;
- разработки и утверждения технических нормативов выбросов,
- использования сборов, полученных за выдачу разрешений на выбросы вредных веществ;
- ограничения или прекращения выбросов вредных веществ.

В полномочия органов государственной власти РФ в области охраны атмосферного воздуха дополнительно включены:

- утверждение методов определения предельно допустимых выбросов;
- установление порядка разработки и утверждения методик расчета выбросов вредных веществ в атмосферный воздух;

– формирование и ведение перечней методик расчета выбросов вредных веществ в атмосферный воздух и методик измерения выбросов вредных веществ.

В полномочия органов государственной власти субъектов РФ в области охраны атмосферного воздуха дополнительно включено установление объема или массы выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух на территории субъекта РФ, а также сроков и уровней их снижения.

В дополнение к существовавшим нормативам выбросов (технические нормативы и предельно допустимые выбросы) введены технологические нормативы и предельно допустимые уровни вредных физических воздействий на атмосферный воздух.

Определено, каким образом должны устанавливаться предельно допустимые выбросы: расчетным путем на основе нормативов качества атмосферного воздуха с учетом фоновой уровня загрязнения атмосферного воздуха.

При невозможности соблюдения предельно допустимых выбросов и (или) технологических нормативов выбросов вместо временно согласованных выбросов устанавливаются временно разрешенные выбросы.

Впервые в явном виде сказано, что на выброс радиоактивных веществ в атмосферный воздух выдается разрешение, в котором устанавливается предельно допустимый выброс радиоактивных веществ.

При отсутствии разрешения на выброс радиоактивных веществ в атмосферный воздух, разрешения на вредное физическое воздействие на атмосферный воздух, а также при нарушении условий, предусмотренных данными разрешениями, юридические лица и индивидуальные предприниматели несут ответственность в соответствии с законодательством РФ.

Выбросы вредных веществ в атмосферный воздух на объектах I категории осуществляются на основании комплексного экологического разрешения.

Выбросы вредных веществ в атмосферный воздух на объектах II категории, за исключением выбросов радиоактивных веществ, осуществляются на основании декларации о воздействии на окружающую среду.

Для осуществления выбросов вредных веществ в атмосферный воздух на объектах III категории получение комплексного экологического разрешения и заполнение декларации о воздействии на окружающую среду не требуются. Юридические лица и индивидуальные предприниматели представляют в уведомительном порядке отчетность о выбросах вредных веществ в атмосферный воздух.

Лица, осуществляющие хозяйственную деятельность с использованием стационарных источников, проводят инвентаризацию стационарных источников и выбросов вредных веществ в атмосферный воздух, документируют и хранят полученные в результате проведения инвентаризации сведения.

Инвентаризация стационарных источников и выбросов вредных веществ в атмосферный воздух проводится инструментальными и расчетными методами. Порядок разработки и утверждения методик расчета выбросов устанавливается Правительством РФ.

Формирование и ведение перечня методик расчета выбросов осуществляются органом исполнительной власти.

Инвентаризация стационарных источников и вредных выбросов на объектах, вводимых в эксплуатацию, проводится не позднее чем через два года после выдачи разрешения на ввод в эксплуатацию указанных объектов.

Корректировка данных инвентаризации стационарных источников и выбросов вредных веществ в атмосферный воздух осуществляется в случаях изменения технологических процессов, замены технологического оборудования, сырья, приводящих к изменению состава, объема или массы выбросов вредных веществ в атмосферный воздух, обнаружения несоответствия между выбросами вредных веществ в атмосферный воздух и данными последней инвентаризации, изменения требований к порядку проведения инвентаризации, а также в случаях, определенных правилами эксплуатации установок очистки газа.

1.1.3. Обзор изменений в Градостроительном кодексе Российской Федерации [7]

Государственная экспертиза проектной документации всех объектов проводится федеральным органом исполнительной власти в отношении объектов, капитального строительства, относящихся в соответствии с законодательством в области охраны окружающей среды к объектам I категории.

При проведении экспертизы оценка соответствия экологическим требованиям проектной документации объектов, относящихся в соответствии с законодательством в области охраны окружающей среды к объектам I категории, не осуществляется.

Не допускается проведение иных экспертиз проектной документации, за исключением экспертизы проектной документации объектов, относящихся в соответствии с законодательством в области охраны окружающей среды к объектам I категории.

Не допускается осуществление иных видов государственного надзора при строительстве, реконструкции объектов капитального строительства, кроме государственного строительного надзора, в отношении объектов, относящихся в соответствии с законодательством в области охраны окружающей среды к объектам I категории.

1.1.4. Обзор изменений в Кодексе Российской Федерации об административных правонарушениях[8]

Соккрытие, умышленное искажение информации, содержащейся в заявлении о постановке на государственный учет объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду, декларации о воздействии на окружающую среду, декларации о плате за негативное воздействие на окружающую среду, отчете о выполнении плана мероприятий по охране окружающей среды или программы повышения экологической эффективности, влечет наложение административного штрафа:

- на граждан в размере от 500 до 1 000 руб.;
- на должностных лиц – от 3 000 до 6 000 руб. (было от 1 000 до 2 000 руб.);
- на юридических лиц – от 20 000 до 80 000 руб. (было от 10 000 до 20 000 руб.).

Невыполнение или несвоевременное выполнение обязанности по подаче заявки на постановку на государственный учет объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду, представлению сведений для актуализации учетных сведений влечет наложение административного штрафа:

- на должностных лиц в размере от 5 000 до 20 000 руб.;
- на юридических лиц – от 30 000 до 100 000 руб.

Осуществление хозяйственной и (или) иной деятельности на объектах, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду без комплексного экологического разрешения, если получение такого разрешения является обязательным, влечет наложение административного штрафа:

- на должностных лиц в размере от 4 000 до 10 000 руб.;
- на юридических лиц от 50 000 до 100 000 руб.

1.1.5. Обзор изменений в Налоговом кодексе Российской Федерации [9]

Инвестиционный налоговый кредит может быть предоставлен организации при осуществлении мероприятий по снижению негативного воздействия на окружающую среду.

Подтверждено, что к материальным расходам относятся затраты налогоплательщика на платежи за выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух, осуществляемые в пределах нормативов допустимых выбросов.

Налогоплательщики вправе применять к основной норме амортизации специальный коэффициент, но не выше 2, в отношении амортизируемых основных средств, относящихся к основному технологическому оборудованию, эксплуатируемому в случае применения наилучших доступных технологий согласно утвержденному Правительством РФ перечню основного технологического оборудования.

При определении налоговой базы не учитываются расходы за выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух, осуществляемые с превышением допустимых нормативов.

Государственная пошлина уплачивается в следующих размерах:

- за выдачу разрешения на временный выброс загрязняющих веществ в атмосферный воздух – 3 500 руб.;
- за выдачу разрешения на выброс радиоактивных веществ в атмосферный воздух – 3 500 руб.;
- за выдачу, продление, комплексного экологического разрешения, а также за внесение в него изменений – 9 500 руб.

1.2. Понятие о наилучшей доступной технологии

В соответствии с Федеральным законом «Об охране окружающей среды» наилучшей доступной технологией (НДТ) является технология:

- обеспечивающая наименьший уровень негативного воздействия на окружающую среду в расчете на единицу производимой продукции либо выполнение предусмотренных международными договорами Российской Федерации показателей;
- обеспечивающая экономическую эффективность от ее внедрения и эксплуатации;
- с приемлемым периодом внедрения и имеющая опыт применения на двух и более объектах.

Определение НДТ осуществляется уполномоченным органом исполнительной власти, который создает технические рабочие группы, включающие экспертов от исполнительной власти, от государственных научных организаций и от некоммерческих организаций.

Пересмотр НДТ осуществляется не реже одного раза в десять лет.

Внедрением НДТ признается ограниченный во времени процесс, в результате которого показатели воздействия на окружающую среду не должны превышать технологические показатели НДТ.

Технологические показатели НДТ устанавливаются государственными стандартами и иными нормативными документами.

В связи с тем, что не всегда удастся на месте оценить ту или иную природоохранную технологию перед ее предполагаемым внедрением, особенно в части ее экономической эффективности, в РФ по примеру промышленно развитых стран, в которых были выпущены Информационно-технические справочники (ИТС) и в которых эти НДТ перечислены [10], также разработаны и опубликованы аналогичные справочники.

ИТС по НДТ содержат:

- информацию о виде деятельности;
- описание экологических проблем, характерных для указанного вида деятельности;
- методологию определения НДТ, ее описание и технологические показатели;
- методы осуществления технологических процессов с целью снижения их негативного воздействия на окружающую среду, которые при этом не должны требовать технического переоснащения;
- экономические показатели, характеризующие НДТ;
- информацию о новейших НДТ, в отношении которых проводятся научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы или осуществляется их опытно-промышленное внедрение;
- сведения о международных информационно-технических справочниках по НДТ.

На начало 2020 г. в РФ было выпущено 50 таких справочников для различных отраслей промышленности. Так, например, для теплоэнергетики выпущен ИТС «Сжигание топлива на крупных установках в целях производства энергии» [11].

1.2.1. Наилучшие доступные технологии снижения выбросов твердых частиц при сжигании твердого топлива

В качестве НДТ утверждены следующие технологии:

- электрофильтры с сокращением выбросов на 98 % и более;
- рукавные фильтры с сокращением выбросов на 99 % и более;

- батарейные циклоны с сокращением выбросов на 85 % и более;
- скрубберы с трубой Вентури с сокращением выбросов на 96 % и более.

1.2.2. Наилучшие доступные технологии снижения выбросов оксидов азота NO_x при сжигании твердого топлива

В качестве НДТ утверждены следующие технологии:

- нестехиометрическое сжигание с сокращением выбросов на 20 % и более;
- рециркуляция дымовых газов с сокращением выбросов на 20 % и более;
- малотоксичная горелка с сокращением выбросов на 30% и более;
- двухступенчатое сжигание с сокращением выбросов на 20 % и более;
- трехступенчатое сжигание с сокращением выбросов на 30 % и более;
- концентрическое сжигание с сокращением выбросов на 20 % и более;
- перевод топки котла с жидкого шлакоудаления на твердое с сокращением выбросов на 50 % и более;
- селективное некаталитическое восстановление с сокращением выбросов на 30 % и более;
- сжигание пыли высокой концентрации с сокращением выбросов на 10% и более;
- сжигание пыли различного фракционного состава с применением мельниц-активаторов с сокращением выбросов на 10 % и более;
- ребернинговые мельницы и динамические сепараторы с сокращением выбросов на 10 % и более;
- горелочные устройства с применением пристенного дутья с сокращением выбросов на 10 % и более;
- плазмотроны с сокращением выбросов на 10 % и более.

1.2.3. Наилучшие доступные технологии снижения выбросов оксидов серы SO_x при сжигании твердого топлива

В качестве НДТ утверждены следующие технологии:

- применение топлива с низким содержанием серы с сокращением выбросов до 100 %;

- мокрая известняковая или известковая сероочистка с сокращением выбросов на 94 % и более;
- аммиачно-сульфатная технология сероочистки с сокращением выбросов на 99 % и более;
- упрощенная мокро-сухая очистка с сокращением выбросов на 50 % и более;
- использование скруббера Вентури по двойному щелочному способу с сокращением выбросов на 50 %.

1.2.4. Наилучшие доступные технологии снижения выбросов оксидов азота NO_x при сжигании жидкого топлива

В качестве НДТ утверждены следующие технологии:

- сжигание с малыми избытками воздуха с сокращением выбросов на 10% и более;
- двухступенчатое сжигание с сокращением выбросов на 30 % и более;
- малотоксичная горелка с сокращением выбросов на 20 % и более;
- рециркуляция дымовых газов с сокращением выбросов на 20 % и более;
- трехступенчатое сжигание с сокращением выбросов на 30 % и более;
- объединение рециркуляции, двухступенчатого сжигания и малотоксичных горелок с сокращением выбросов на 60 % и более;
- эмульгирование мазута с сокращением выбросов на 10 % и более.

1.2.5. Наилучшие доступные технологии снижения выбросов оксидов серы SO_x при сжигании жидкого топлива

В качестве НДТ утверждены следующие технологии:

- использование мазутного топлива с низким содержанием серы;
- совместное сжигание жидкого топлива и газа.

1.2.6. Внедрение наилучших доступных технологий

Внедрение НДТ затруднено в связи с тем, что в экономической эффективности природоохранных мероприятий не учитывается их основная экономическая составляющая, а именно снижение ущерба окружающей среде. При определении экономического эффекта от внедренных работ на промышленных предприятиях учитывается только уменьшение стоимости платежей за выбросы.

В соответствии с пунктом 2.10 утвержденной методики определения предотвращенного экологического ущерба [12] учитывается только массовое уменьшение выбросов независимо от высоты источника выброса и создаваемого поля загрязнения, а подсчитанный предотвращенный экологический ущерб от выбросов загрязняющих веществ в атмосферу рассматривается как результат деятельности природоохранных органов, проведения комплекса воздухоохраных мероприятий, реализации природоохранных программ.

С 1 июля 2015 г. вступил в силу ГОСТ Р 56167-2014, определяющий метод расчета вреда, нанесенного выбросами загрязняющих веществ конкретного промышленного предприятия объектам окружающей среды, экологическим системам, строительным конструкциям, памятникам и сельскохозяйственным культурам [13]. Методика расчета ущерба не учитывает индивидуальные условия выброса и создаваемые ими приземные концентрации. Учитывается только уменьшение выброса. Так, стоимость сокращенного выброса для энергетических объектов оценивается: взвешенные вещества – 132 руб./т; SO_2 – 178 руб./т; CO – 84 руб./т; NO_x – 84 руб./т. Такие же расценки установлены и для предприятий нефтепереработки, для них плата за выброс CO установлена даже меньше – 64 руб./т, несмотря на то, что высота выброса на ТЭС в несколько раз больше, чем на нефтеперерабатывающих предприятиях. Непонятны и соотношения между ними. Так разовая ПДК для NO_x в 2,5 раза меньше, чем для SO_2 . А выброс SO_2 оценивается в 2,1 раза выше.

Плата за разрешенные выбросы независимо от типа предприятия и высоты выброса установлена Постановлением Правительства РФ «О ставках платы за негативное воздействие на окружающую среду и дополнительных коэффициентах» [14]: за выброс NO_2 на 2018 г. установлена в размере 138,8 руб./т, за выброс NO – 93,5 руб./т, за SO_2 – 45,4 руб./т, за CO – 1,6 руб./т.

В результате получается, что если на котле ТГМ-84 производительностью 420 т/чв три раза снизить выброс оксидов азота, то экономический эффект составит всего примерно 20 тыс. руб./год.

Редким исключением является перевод котла в режим работы с предельно низкими избытками воздуха, когда одновременно с уменьшением выбросов оксидов азота увеличивается его КПД.

Отдельно стоит также вопрос внедрения парогазовых установок (ПГУ), у которых за счет существенного повышения КПД по сравнению с паротурбинными установками (ПТУ) сокращаются выбросы вредных газов. Такое внедрение требует больших инвестиций и может быть реализовано только за счет специальных государственных программ.

Все это приводит к тому, что подавляющее количество природоохранных мероприятий не являются и не могут быть самоокупаемыми по крайней мере при нынешних платежах за выбросы. Поэтому внедрение НДТ относится, как правило, к вынужденной реконструкции энергообъекта по доведению экологических показателей его эксплуатации до современных нормативов [15]. В этом случае прироста прибыли как правило нет, а результатом является снижение затрат на возмещение ущерба от загрязнения окружающей среды, распределенное по всей территории, на которой имело место снижение концентраций вредных веществ.

Тем не менее, как указано в [1], на объектах I категории стационарные источники должны быть оснащены автоматическими средствами измерения и учета показателей выбросов вредных (загрязняющих) веществ, а также техническими средствами фиксации и передачи информации о показателях выбросов вредных (загрязняющих) веществ в государственный реестр объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду. На них же должны быть внедрены НДТ в соответствии с [11].

Список 300 предприятий промышленности, представляющих наибольшую экологическую опасность, 39 из которых – объекты ТЭК, приведен в приложении к Приказу Минприроды России [16].

Таблица 1.1

Предприятия топливно-энергетического комплекса,
представляющие наибольшую экологическую опасность

Место в перечне [16]	Код объекта	Наименование объекта
1	2	3
1	01-0122-000028-П	Производство тепловой и электрической энергии
4	01-0122-001598-П	Объект по производству тепловой и электрической энергии
8	04-0124-000061-П	Назаровская ГРЭС
10	04-0124-000075-П	Промплощадка АО «Красноярская ТЭЦ-1»
11	04-0124-000087-П	Промплощадка ПАО «ОГК-2» Филиал Красноярская ГРЭС-2

Окончание табл. 1.1

1	2	3
12	04-0124-000116-П	Красноярская ТЭЦ-2
18	05-0125-000172-П	Административный корпус с промплощадкой СП Артемовская ТЭЦ филиал «Приморская генерация» АО «ДГК»
26	08-0127-000383-П	Хабаровская ТЭЦ-3 (филиал «Хабаровская генерация»)
28	10-0128-000157-П	Структурное подразделение «Благовещенская ТЭЦ» филиала «Амурская генерация» АО «Дальневосточная генерирующая компания»
46	19-0135-000298-П	Череповецкая ГРЭС
75	32-0142-000201-П	Промплощадка Беловской ГРЭС
80	32-0142-000275-П	Томь-Усинская ГРЭС ОАО «Кузбассэнерго»
93	33-0143-001006-П	Кировская ТЭЦ-5
95	34-0144-001059-П	Промышленная площадка филиала «Костромская ГРЭС» АО «Интер РАО – Электрогенерация»
107	41-0178-003517-П	Филиал ПАО «ОГК-2»– Киришская ГРЭС
116	45-0177-004727-П	ТЭЦ-26 – филиал ПАО «Мосэнерго»
118	46-0177-001561-П	Основная площадка Каширской ГРЭС
122	46-0177-005082-П	ТЭЦ-22 филиал ПАО
130	50-0154-001051-П	ТЭЦ-2 АО «СИБЭКО»
131	50-0154-001052-П	ТЭЦ-3 АО «СИБЭКО»
132	50-0154-001053-П	ТЭЦ-5 АО «СИБЭКО»
133	52-0155-000057-П	АО «Территориальная генерирующая компания № 11» Структурное подразделение «ТЭЦ-4»
134	52-0155-000058-П	Производственная территория СП ТЭЦ-5
144	53-0156-000125-П	Промплощадка № 1 Филиала «Ириклинская ГРЭС»
156	60-0161-000744-П	Филиал ПАО «ОГК-2»– Новочеркасская ГРЭС
158	61-0162-000128-П	Рязанская ГРЭС
163	65-0166-000095-П	ПАО «Энел Россия» филиал «Рефтинская ГРЭС»
177	66-0167-000104-П	Объект деятельности по обеспечению электрической и тепловой энергией (филиал «Смоленская ГРЭС» ПАО «Юнипро»)
186	70-0171-001430-П	Филиал «Черепетская ГРЭС имени Д.Г. Жимерина» АО «Интер РАО – Электрогенерация»
193	71-0186-000954-П	Паросиловые энергоблоки ПСУ-800МВт N 1-6
212	71-0186-002361-П	Производственная площадка промышленного комплекса Нижневартовская ГРЭС
235	75-0174-001454-П	ЧТЭЦ-2
237	75-0174-001835-П	Филиал ПАО «ОГК-2»– Троицкая ГРЭС
240	75-0174-002174-П	Филиал «Южноуральская ГРЭС» (ГРЭС-1)
247	76-0175-000012-П	Объект по производству электроэнергии, пара и горячей воды тепловыми электростанциями
248	76-0175-001119-П	Промплощадка Читинской ТЭЦ-1
263	87-0111-001019-П	Электростанция ТЭЦ-2 – территория промышленной площадки
277	92-0116-001331-П	Заинская ГРЭС
289	98-0114-000001-П	Нерюнгринская ГРЭС

В табл. 1.2 приведен список тепловых электростанций, расположенных в городах с высоким уровнем загрязнения воздуха [17].

Таблица 1.2

Список ТЭС, расположенных в городах с высоким уровнем
загрязнения воздуха

№ п/п	Город	Электростанция
1	Братск	Иркутская ТЭЦ-6
2	Братск	Участок ТИТС (Иркутская ТЭЦ-7)
3	Красноярск	Красноярская ТЭЦ-1
4	Красноярск	Красноярская ТЭЦ-2
5	Красноярск	Красноярская ТЭЦ-3
6	Липецк	Липецкая ТЭЦ-2
7	Магнитогорск	ТЭЦ Магнитогорского металлургического комбината
8	Медногорск	Медногорская ТЭЦ
9	Нижний Тагил	ТЭЦ Нижнетагильского металлургического комбината
10	Нижний Тагил	ТЭЦ АО НПК «Уралвагонзавод»
11	Новокузнецк	Кузнецкая ТЭЦ
12	Норильск	Норильская ТЭЦ-1
13	Норильск	Норильская ТЭЦ-2
14	Норильск	Норильская ТЭЦ-3
15	Омск	Омская ТЭЦ-3
16	Омск	Омская ТЭЦ-4
17	Омск	Омская ТЭЦ-5
18	Челябинск	Челябинская ТЭЦ-1
19	Челябинск	Челябинская ТЭЦ-2
20	Челябинск	Челябинская ТЭЦ-3
21	Челябинск	Челябинская ГРЭС
22	Челябинск	ТЭЦ Челябинского металлургического комбината (Мечел)
23	Череповец	ТЭЦ-ПВС Череповецкого металлургического комбината (Северсталь)
24	Череповец	ТЭЦ-ЭВС-2 Череповецкого металлургического комбината (Северсталь)
25	Череповец	ТЭЦ АО «ФосАгро-Череповец»
26	Череповец	Череповецкая ГРЭС
27	Чита	Читинская ТЭЦ-1
28	Чита	Читинская ТЭЦ-2

Однако не всегда причиной повышенных концентраций в воздухе является работа ТЭС. Поэтому не все они находятся в табл. 1.1.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение понятия «допустимый выброс».
2. Поясните термин «наилучшая доступная технология».
3. Какие объекты относятся к I категории экологической опасности?
4. Какие объекты относятся ко II категории экологической опасности?
5. Какие объекты относятся к III категории экологической опасности?
6. Какие объекты относятся к IV категории экологической опасности?
7. Расскажите, что является платежной базой для исчисления платы за негативное воздействие на окружающую среду.
8. Какие поправочные коэффициенты вводятся при исчислении платы за выбросы?
9. В каких случаях осуществляется государственная поддержка деятельности в целях охраны окружающей среды?
10. Какими способами осуществляется государственная поддержка деятельности в целях охраны окружающей среды?
11. Назовите основной норматив качества окружающей среды.
12. Дайте определение техническому нормативу выбросов.
13. Дайте определение технологическому нормативу выбросов.
14. Какие сведения содержат информационно-технические справочники по наилучшим доступным технологиям?
15. В какие сроки осуществляется пересмотр наилучшей доступной технологии?
16. Расскажите, что такое комплексное экологическое разрешение.
17. В каких случаях подается декларация о воздействии на окружающую среду?
18. Перечислите случаи, когда плановые экологические проверки не проводятся.
19. Укажите обстоятельства, при которых стационарные источники должны быть оснащены автоматическими средствами измерения и учета показателей выбросов вредных веществ.
20. Что такое государственный реестр объектов?
21. Дайте определение предельно допустимого выброса.

2. ВРЕДНЫЕ ВЫБРОСЫ ТЭС

2.1. Предельно допустимые концентрации вредных выбросов

Предельно допустимая концентрация (ПДК) вредного вещества в атмосфере – это максимальная концентрация, отнесенная к определенному времени осреднения, которая не оказывает ни прямого, ни косвенного вредного действия на человека, его потомство и санитарные условия жизни [18].

Первоначально основным критерием для установки уровня ПДК было отсутствие запаха. По мере накопления данных и с усовершенствованием медицинских приборов уровни ПДК изменялись в сторону уменьшения.

В настоящее время под ПДК декларируется следующее понимание: это такая максимальная концентрация химических элементов и их соединений в окружающей среде, которая при повседневном влиянии в течение длительного времени на организм человека не вызывает патологических изменений или заболеваний, устанавливаемых современными методами исследований, в любые сроки жизни настоящего и последующего поколений.

Однако в последние 20 лет начался обратный процесс. Особенно наглядно это видно на примере метилмеркаптана, очень неприятно пахнущего вещества. За последние 20 лет ПДК по метилмеркаптану была увеличена в 660 раз! [19]. При такой ПДК запах метилмеркаптана хорошо ощущается, т.к. она в 1,5–3 раза превышает порог восприятия ее запаха человеком. В 3,3 раза были увеличены ПДК для формальдегида и фенола.

Что касается тепловых электростанций, здесь тоже увеличилась ПДК для диоксида азота с 0,085 до 0,2 мг/м³, т. е. в 2,35 раза [20].

Причиной такого процесса являются не только субъективные, но и объективные факторы. По некоторым веществам были установлены настолько низкие ПДК, которые при современном развитии общества оказалось выполнить практически невозможно, так как на это потребовались бы огромные средства. «Практическая недостижимость ПДК по многим веществам» – вот как охарактеризовал ситуацию в России заместитель директора Главной геофизической обсерватории (ГГО) по научной работе С.С. Чичерин [21].

Если принять за целевую функцию длительность жизни людей, то окажется, что эти средства более эффективно вложить в медицину и социальное обеспечение людей, чем добиваться идеальной чистоты

воздуха. И чем более развито промышленное производство, тем более высокими будут оптимальные (с точки зрения продолжительности жизни) ПДК. Это подтверждает и опыт США, где по национальному стандарту, например, среднесуточная ПДК по диоксидам азота в 2,5 раза выше, чем в России, разовая концентрация по диоксидам серы в 2,6 раза больше, разовая концентрация по оксиду углерода больше в 8 раз [22]. При этом средняя продолжительность жизни там составляет 76 лет для мужчин и 81 год для женщин. В России соответственно 67 и 77 лет.

Таким образом, ПДК является не только медицинским параметром, но и социально-экономическим. Не смогут долго жить бедные и больные люди даже в абсолютно чистом воздухе.

При определении ПДК учитывается наиболее сильная направленность действия вещества из рефлекторного, резорбтивного и санитарно-гигиенического. Та направленность, при которой ПДК оказываются меньше, называется лимитирующей.

Под рефлекторным действием понимается реакция со стороны рецепторов верхних дыхательных путей: ощущение запаха, раздражение слизистых оболочек, задержка дыхания и т. д. Указанные эффекты возникают при кратковременном воздействии вредных веществ, поэтому рефлекторное действие лежит в основе установления максимально разового (20-минутного) ПДК – ПДК_{м.р.}.

Под резорбтивным действием понимают возможность развития общетоксических, гонадотоксических, эмбриотоксических, мутагенных, канцерогенных и других эффектов, возникновение которых зависит не только от концентрации вещества в воздухе, но и от длительности его вдыхания. С целью предупреждения развития резорбтивного действия устанавливается среднесуточная ПДК – ПДК_{с.с.}.

Для некоторых веществ (красители), не оказывающих на уровне низких концентраций рефлекторного или резорбтивного действия, но способных при оседании из воздуха придавать объектам окружающей среды (например, снегу) необычную окраску, тем самым создавая у человека ощущение опасности или дискомфорта, в качестве лимитирующего используется санитарно-гигиенический показатель вредности.

Кроме ПДК для атмосферы устанавливаются также ПДК вредного вещества в воздухе рабочей зоны, которые при ежедневной (кроме выходных дней) работе в течение 8 ч и не более 40 ч в неделю в течение всего рабочего стажа не должны вызывать заболеваний или отклонений в состоянии здоровья, обнаруживаемых современными методами исследований в процессе работы или в отдаленные сроки жизни настоящего и последующих поколений. Воздействие вредного вещества

на уровне ПДК не исключает нарушение состояния здоровья у лиц с повышенной чувствительностью. ПДК в воздухе рабочей зоны для большинства веществ являются максимально разовыми.

Рабочая зона – это пространство высотой до 2 м над уровнем пола или площадки, на котором находятся места постоянного или временного (непостоянного) пребывания работающих. Постоянное рабочее место – место, на котором работающий находится большую часть своего рабочего времени (более 50 % или более 2 ч непрерывно). Если при этом работа осуществляется в различных пунктах рабочей зоны, постоянным рабочим местом считается вся рабочая зона.

Гигиенические нормативы – это предельно допустимые концентрации вредных веществ в воздухе рабочей зоны (ПДК_{р.з.}), которые распространяются на рабочие места, независимо от их расположения (в производственных помещениях, в горных выработках, на открытых площадках, транспортных средствах и т. п.). Эти нормативы установлены на основании комплексных токсиколого-гигиенических и эпидемиологических исследований с учетом международного опыта.

С 1 марта 2021 г. действуют санитарные правила и нормы СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания».

В этом документе установлены новые интервалы времени осреднения отбора проб. К максимальной разовой концентрации ПДК_{м.р} относится проба с интервалом времени осреднения от 20 до 30 мин, к среднесуточной ПДК_{с.с} относится проба с интервалом времени осреднения от 24 ч до одного года, а к вновь введенному интервалу среднегодовой пробы ПДК_{с.г} относится интервал времени больше года.

Среднесуточная ПДК_{с.с} по диоксиду азота увеличена с 0,04 до 0,1 мг/м³, а значение 0,04 мг/м³ относится теперь к среднегодовой ПДК_{с.г}.

Значение ПДК по оксиду азота 0,06 мг/м³, которое относилось к среднесуточной, теперь относится к среднегодовой ПДК_{с.г}.

ПДК для оксидов серы и углерода остались без изменений за исключением того, что среднегодовой ПДК_{с.г} по оксиду углерода присвоено значение среднесуточной.

Установлена среднегодовая ПДК_{с.г} для пентаоксида ванадия.

Среднегодовая ПДК_{с.г} для бенз(а)пирен установлена на уровне среднесуточной.

Сделана более подробная детализация ПДК для твердых выбросов, но ПДК для рабочей зоны принимается по параметру «зола».

ПДК выбросов, характерных для котлов ТЭС, приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

ПДК вредных выбросов котлов ТЭС

Вещество	ПДК _{м.р} , мг/м ³	ПДК _{с.с} , мг/м ³	ПДК _{с.г} , мг/м ³	ПДК _{р.з} , мг/м ³
Диоксид азота	0,2	0,1	0,04	2,0
Оксид азота	0,4	-	0,06	5,0
Диоксид серы	0,5	0,05	-	10,0
Оксид углерода	5,0	3,0	3,0	20,0
Бенз(а)пирен	—	0,000001	0,000001	0,00015
Мазутная зола (ванадия пятиокись)	—	0,002	0,00007	—
Сланцевая зола	0,3	0,1	-	4,0
Угольная зола теплоэлектростанций (с содержанием окиси кальция 35–40 %, дисперсностью до 3 мкм и ниже не менее 97 %)	0,05	0,02		4,0
Зола углей Подмосковского, Печорского, Кузнецкого, Донецкого, Экибастузского, марки Б1 Бабаевского и Тюльганского месторождений (с содержанием SiO ₂ свыше 20 до 70 %)	0,3			4,0

Уточнены группы суммации вредного действия, в том числе для веществ, характерных для выбросов тепловых электростанций:

- азота диоксид и оксид, мазутная зола, серы диоксид;
- азота диоксид, серы диоксид, углерода оксид.

Установлено также, что суммация действия азота диоксид и серы диоксида неполная, поэтому принято, что при совместном присутствии в атмосферном воздухе азот диоксид и серы диоксид, сумма отношений их концентраций к ПДК не должна превышать не 1,0, а 1,6, что равнозначно повышению ПДК для основных выбросов ТЭС еще на 60 %.

В СанПиН 1.2.3685-21 также приведены нормативы безвредности для людей химических соединений, которые установлены на основании расчетов, проведенных по параметрам токсикометрии веществ, с помощью интерполяций и экстраполяций в рядах соединений, близких

по химической структуре, физическим и химическим свойствам и характеру действия. Настоящие нормативы применяются для условий опытных и полужаводских установок на период, предшествующий проектированию производства.

2.2. Приборный контроль выбросов

Вредные выбрасываемые вещества, на которые установлены допустимые величины выбросов (технические нормативы), называются нормируемыми.

Нормированию подлежат выбросы следующих загрязняющих веществ, содержащихся в дымовых газах котлов ТЭС:

- диоксидов азота и серы;
- оксидов азота и углерода;
- золы твердого топлива и мазутной золы ТЭС;
- сажи и бенз(а)пирена (только для котлов паропроизводительностью менее 30 т/ч).

Если перечисленные загрязняющие вещества создают расчетную приземную концентрацию в зоне жилой застройки 0,05 ПДК и менее (без учета фона), то они нормируются только в тоннах в год, и их выбросы классифицируются как ПДВ. Выбросы, нормируемые только в тоннах в год, в суммации не учитываются [23]. Поэтому выбросы мазутной золы ТЭС, оксида углерода, сажи и бенз(а)пирена не лимитируются и не измеряются, а только подтверждаются расчетными методами.

Если концентрация c , г/м³, заданного вещества в уходящих дымовых газах котлов измеряется с помощью датчика, установленного в газоходе (по месту), то его выброс M , г/с, рассчитывается по формуле:

$$M = cV, \quad (2.1)$$

где V – объемный расход дымовых газов, м³/с.

Если имеется специальное устройство, установленное и оттарированное специализированной организацией, которое позволяет определить среднюю по площади поперечного сечения скорость газов w , м/с, то объемный расход

$$V = Fw, \quad (2.2)$$

где F – площадь поперечного сечения в месте определения скорости газов, м².

Если такого устройства нет, то объемный расход рассчитывается по формуле:

$$V = B \left[V_{\Gamma}^0 + V_{\text{В}}^0 (\alpha - 1) \right] \frac{273 + t_{\text{yx}}}{273}, \quad (2.3)$$

где B – расход топлива, кг/с; V_{Γ}^0 – объем продуктов сгорания 1 кг топлива при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1$, м³; $V_{\text{В}}^0$ – объем теоретически необходимого воздуха для сгорания топлива, м³; α – коэффициент избытка воздуха в сечении, где определяется концентрация продуктов сгорания; t_{yx} – температура уходящих дымовых газов в этом же сечении, °С.

Если концентрация вредного вещества определяется прибором с отбором пробы и пробоподготовкой, то нужно учитывать, что дымовые газы после отбора пробы охлаждаются, их удельный объем при этом уменьшается, а влага из пробы конденсируется и удаляется. Прибор при этом показывает концентрацию вредной примеси при нормальных условиях, т. е. $c_{\text{нУ}}$, г/м³.

В этом случае определяется объемный расход газов при нормальных условиях $V_{\text{нУ}}$, м³/с, который рассчитывается по формуле:

$$V_{\text{нУ}} = B \left[V_{\text{сГ}}^0 + V_{\text{В}}^0 (\alpha - 1) \right], \quad (2.4)$$

где $V_{\text{сГ}}^0$ – объемный расход сухих газов при сгорании 1 кг топлива с $\alpha = 1$.
Может быть найден как

$$V_{\text{сГ}}^0 = V_{\Gamma}^0 - V_{\text{H}_2\text{O}}^0, \quad (2.5)$$

где $V_{\text{H}_2\text{O}}^0$ – объем паров воды в продуктах сгорания.

Выброс M , г/с, в этом случае рассчитывается по формуле:

$$M = c_{\text{нУ}} V_{\text{нУ}}. \quad (2.6)$$

Если концентрация вредного вещества c определена при реальном избытке воздуха α , то для возможности сравнений экологических особенностей различных котлов, работающих при различных избытках воздуха, она приводится к нормативному избытку воздуха. В России это $\alpha_{\text{н}} = 1,4$.

Приведение проводится по формуле:

$$c_H = c \frac{\alpha}{\alpha_H}. \quad (2.7)$$

Концентрацию вредного вещества удобнее измерять в объемных долях, так как она мало зависит от температуры газа. Это объясняется тем, что газ-носитель и газ-примесь практически одинаково изменяют свои объемы при изменении температуры. Современные газоаналитические приборы градуируются в объемных величинах, а если концентрация примеси мала, как, например, для котлов ТЭС, они градуируются в *ppm*, это одна миллионная доля, читается как «пропромилле», т. е. «*partpermillion*». $1 \text{ ppm} = 0,0001 \%$ объемных.

Объемную концентрацию в массовую достаточно точно можно пересчитать с помощью коэффициента

$$k = \frac{\mu}{V} \frac{273}{(273 + t_r)}, \quad (2.8)$$

где μ – молярная масса измеряемого вещества; V – молярный объем, $V = 22,41$ л; t_r – температура пробы перед газоанализатором.

Для диоксида азота молярная масса $\mu = 46$, тогда при температуре остывшей пробы газа $t_r = 20$ °С имеем $k = 1,91$. Таким образом, если газоанализатор показывает 100 ppm NO_2 , то его массовая концентрация составит 191 мг/м^3 .

Если газоанализатор уже показывает концентрацию, приведенную к нормальным условиям, то температурная поправка не делается и $k = 2,05$.

Коэффициент избытка воздуха с достаточной степенью точности может быть найден по приближенной формуле:

$$\alpha = \frac{21}{21 - O_2}, \quad (2.9)$$

где O_2 – концентрация кислорода в сечении, где отбирается проба, %.

В уходящих газах паровых и водогрейных котлов монооксид азота NO составляет 95–99 % общего выброса NO_x , в то время как содержание более токсичного диоксида азота NO_2 не превышает 1–5 %. После выброса дымовых газов в атмосферу в основном с помощью природного озона большая часть NO доокисляется до NO_2 . Поэтому расчет массовых концентраций и выбросов оксидов азота NO_x ведется в пересчете на NO_2 . Время полного доокисления составляет несколько часов и до зоны

максимальных концентраций полной конвертации оксида в диоксид не происходит из-за недостатка времени, которое составляет всего порядка 40 мин. Поэтому с определенным запасом принимается, что доокисляется только на 80% от суммы $M_{NO_x} = M_{NO} + M_{NO_2}$. Или

$$M_{NO_2} = 0,8M_{NO_x}. \quad (2.10)$$

Тогда в виде NO остается

$$M_{NO} = (1 - 0,8)M_{NO_x} \frac{\mu_{NO}}{\mu_{NO_2}} = 0,13M_{NO_x}. \quad (2.11)$$

Это имеет некоторое значение, так как разовая ПДК для NO в настоящее время в два раза больше, чем для NO₂, см. табл. 2.1.

2.3. Расчетные методы определения выбросов

2.3.1. Расчет выбросов оксидов азота

Расчетные методы определения выбросов используются при проектировании новых котлов, а также при отсутствии возможности провести измерение концентрации на действующих котлах.

Для паровых котлов паропроизводительностью 30–75 т/ч и водогрейных котлов теплопроизводительностью 30–50 Гкал/ч расчет выбросов оксидов азота проводится по формуле [23]:

$$M_{NO_2} = BK_{NO_2} \left(1 - \frac{q_4}{100}\right) \beta_1 (1 - \varepsilon_1 r) \beta_2 \beta_3 \varepsilon_2 \left(1 - \eta \frac{n_o}{n_k}\right), \quad (2.12)$$

где B – расход условного топлива в той размерности, в которой хотим получить выброс оксидов азота; K_{NO_2} – коэффициент, характеризующий выход оксидов азота, определяется по формулам (2.13) и (2.14); q_4 – потери тепла от механической неполноты сгорания топлива, %; β_1 – коэффициент, учитывающий качество сжигаемого топлива, определяется по формулам (2.15) и (2.16) и табл. 2.2; β_2 – коэффициент, учитывающий вид шлакоудаления. Принимается при твердом шлакоудалении равным 1,0, при жидком – 1,6; r – степень рециркуляции дымовых газов; ε_1 – коэффициент, характеризующий эффективность рециркуляции газов в зависимости от места ввода газов в топку при номинальной нагрузке,

принимается по табл. 2.3; ε_2 – коэффициент, характеризующий уменьшение выбросов оксидов азота при двухступенчатом сжигании топлива при подаче части воздуха δ помимо основных горелок. Принимается по табл. 2.2. При промежуточных значениях допускается линейная интерполяция; η – доля оксидов азота, улавливаемая в азотоочистной установке; n_o и n_k – время работы азотоочистки и котла соответственно.

Таблица 2.2

Зависимость коэффициента ε_2 от подачи воздуха
помимо основных горелок

δ		5	10	15	20
ε_2	мазут	0,9	0,8	0,7	0,62
	уголь	0,87	0,74	0,64	0,58
	газ	0,82	0,68	0,56	0,49

Коэффициент, характеризующий выход оксидов азота K_{NO_2} , определяется для паровых котлов по формуле:

$$K_{NO_2} = 7,5 \frac{D_{\phi}}{50 + D_H}, \quad (2.13)$$

где D_{ϕ} и D_H – фактическая и номинальная паропроизводительность котла соответственно, т/ч.

Для водогрейных котлов производительностью 125–210 ГДж/ч (30–50 Гкал/ч):

$$K_{NO_2} = 2,5 \frac{Q_{\phi}}{84 + Q_H}, \quad (2.14)$$

где Q_{ϕ} и Q_H – фактическая и номинальная тепловая производительность котла соответственно, ГДж/ч.

Значения коэффициента β_1 для твердого топлива вычисляют по формулам:

при $\alpha_T \leq 1,25$ $\beta_1 = 0,178 + 0,47N^Г$; (2.15) при $\alpha_T > 1,25$

$$\beta_1 = \frac{\alpha_T (0,178 + 0,47N^Г)}{1,25}, \quad (2.16)$$

где $N^Г$ – содержание азота в топливе в % на горючую массу.

При сжигании жидкого или газообразного топлива значение коэффициента β_1 принимается по табл. 2.3.

Таблица 2.3

Величина коэффициента β_1 для жидкого или газообразного топлива

α_T	β_1
$> 1,05$	1,0
1,05 – 1,03	0,9
$< 1,03$	0,75

Если максимальные температуры газов в топке не превосходят 1500°C , то ε_1 принимается равным 0. При более высокой температуре газов значение коэффициента ε_1 принимается по табл. 2.4.

Таблица 2.4

Величина коэффициента ε_1

Топливо	Место ввода газов рециркуляции	ε_1
Твердое	Во вторичный воздух	0,005
	В первичную аэросмесь	0,010
Газ и мазут	В подтопки при расположении горелок на вертикальных экранах	0,0025
	Через щели под горелками	0,015
	По наружному каналу горелок	0,025
	В воздушное дутье и в рассечку двух воздушных потоков	0,035

При частичной нагрузке коэффициент умножают на коэффициент f , определяемый по соотношению:

$$f = 0,6 \frac{D_{\Phi}}{D_H} + 0,4. \quad (2.17)$$

Формула (2.17) справедлива при условии $0,5 \leq D_{\Phi}/D_H \leq 1$.

2.3.2. Расчет выбросов оксидов серы

Суммарное количество оксидов серы M_{SO_2} , выбрасываемых в атмосферу с дымовыми газами, вычисляют по формуле [24]:

$$M_{SO_2} = 0,02BS^p \left(1 - \eta'_{SO_2}\right) \left(1 - \eta''_{SO_2}\right) \left(1 - \frac{n_c}{n_k} \eta^c_{SO_2}\right), \quad (2.18)$$

где B – расход натурального топлива; S^p – содержание серы в топливе на рабочую массу (сумма органической и колчеданной серы); η'_{SO_2} – доля оксидов серы, улавливаемых летучей золой в котле; η''_{SO_2} – доля оксидов серы, улавливаемых в мокрых золоуловителях; $\eta^c_{SO_2}$ – доля оксидов серы, улавливаемых в сероулавливающей установке; n_c и n_k – длительность работы сероулавливающей установки и котла соответственно.

Размерность массового выброса будет такая же, как и заданная размерность расхода топлива B (г/с, т/ч, т/год).

Ориентировочные значения η'_{SO_2} при факельном сжигании топлива приведены в табл. 2.5.

Доля оксидов серы η''_{SO_2} , улавливаемых в сухих золоуловителях (электрофилтрах, батарейных циклонах), принимается равной нулю. В мокрых золоуловителях МС и МВ эта доля зависит от общей щелочности орошающей воды и от приведенной сернистости топлива $S^{пр}$.

$$S^{пр} = \frac{S^p}{Q_H^p}, \quad (2.19)$$

где Q_H^p – низшая теплотворная способность на рабочую массу топлива.

При принятых на тепловых электростанциях удельных расходах воды на орошение золоуловителей $0,1-0,15 \text{ дм}^3/\text{нм}^3$ η''_{SO_2} определяется по табл. 2.6.

Таблица 2.5

Величина η'_{SO_2} при факельном сжигании топлива

Топливо	η'_{SO_2}
Торф	0,15
Сланцы: эстонские и ленинградские других месторождений	0,8 0,5
Экибастузский уголь	0,02
Березовские угли Канско-Ачинского бассейна: для топок с твердым шлакоудалением для топок с жидким шлакоудалением	0,5 0,2
Другие угли Канско-Ачинского бассейна: для топок с твердым шлакоудалением для топок с жидким шлакоудалением	0,2 0,05
Угли других месторождений	0,1
Мазут	0,02
Газ	0

Таблица 2.6

Зависимость доли оксидов серы, улавливаемых
в мокрых золоуловителях от щелочности воды

Щелочность мг-экв/дм ³	Приведенная сернистость топлива, $S^{\text{пр}}$, % · кг/МДж							
	0,01	0,02	0,03	0,04	0,06	0,08	0,10	0,15
0	2,4	2,0	1,8	1,7	1,5	1,3	1,2	1,2
5	14,5	8,5	5,0	4,0	2,5	2,3	1,8	1,3
10	29,0	19,0	10,0	7,0	4,4	2,8	2,4	1,4

При промежуточных значениях величин допускается линейная интерполяция.

2.3.3. Расчет выбросов твердых частиц топлива

В составе твердых частиц, оставшихся в продуктах сгорания топлива, имеются как негорючие частицы, входящие в состав топлива (зола), так и горючие, но не сгоревшие частицы (механический недожог).

Если имеются данные по содержанию горючих частиц в уносе, то для расчета выбросов твердых частиц $M_{\text{ТВ}}$, г/с, следует воспользоваться формулой (2.20), а если таких данных нет – формулой (2.21):

$$M_{\text{ТВ}} = B \frac{A^p}{100 - \Gamma_{\text{УН}}} a_{\text{УН}} (1 - \eta_3), \quad (2.20)$$

$$M_{\text{ТВ}} = 0,01B \left(a_{\text{УН}} A^p + q_4 \frac{Q_{\text{Н}}^p}{32,68} \right) (1 - \eta_3), \quad (2.21)$$

где B – расход натурального топлива, г/с; A^p – зольность на рабочую массу топлива, %; $\Gamma_{\text{УН}}$ – содержание горючих в уносе, %; $a_{\text{УН}}$ – доля золы, уносимой газами из котла; η_3 – доля золы, улавливаемой в золоуловителе; q_4 – потери тепла от механической неполноты сгорания, %; $Q_{\text{Н}}^p$ – низшая теплота сгорания топлива, МДж/кг; 32,68 – теплота сгорания углерода, МДж/кг.

2.3.4. Расчет выбросов мазутной золы в пересчете на ванадий

Суммарное количество мазутной золы, $M_{\text{МЗ}}$, г/с, вычисляют по формуле:

$$M_{\text{МЗ}} = G_v B (1 - \eta_{\text{ос}}) \left(1 - \frac{\eta_{\text{кУ}}^v}{100} \right) k_{\text{П}}, \quad (2.22)$$

где $\eta_{\text{ос}}$ – доля ванадия, оседающего с твердыми частицами на поверхности нагрева мазутных котлов, которую принимают равной: 0,07 – для котлов с промежуточными пароперегревателями, очистка которых проводится в остановленном состоянии, 0,05 – для котлов без промежуточных пароперегревателей при тех же условиях очистки; $\eta_{\text{кУ}}^v$ – степень очистки дымовых газов от мазутной золы в золоулавливающих установках, %; $k_{\text{П}} = 0,278 \cdot 10^{-3}$ при выбросах в г/с, $k_{\text{П}} = 10^{-6}$ при определении выбросов в тоннах; G_v – количество ванадия, находящегося в 1 т мазута, г/т:

$$G_v = a_v 10^4, \quad (2.23)$$

где a_v – фактическое содержание ванадия в мазуте, %.

При отсутствии данных химического анализа

$$G_v = 2222A^p, \quad (2.24)$$

где A^p – содержание золы в мазуте на рабочую массу, %.

2.3.5. Расчет выбросов бенз(а)пирена в атмосферу паровыми котлами электростанций

Методика расчета выбросов бенз(а)пирена приведена в [25]. Настоящая методика устанавливает правила расчета выбросов бенз(а)пирена с дымовыми газами паровых котлов тепловых электростанций при факельном сжигании жидкого, газообразного и твердого топлив, а также смеси указанных топлив.

Методика предназначена для расчета выбросов бенз(а)пирена при проведении инвентаризации выбросов, при оценке воздействия тепловых электростанций на окружающую природную среду и в научно-исследовательских целях.

Концентрация бенз(а)пирена в сухих дымовых газах котлов при сжигании мазута C_m , мкг/м^3 , приведенная к избытку воздуха в газах $\alpha = 1,4$, рассчитывается по формуле:

$$C_m = \frac{q_{\text{пг}}^{-0,53} (0,232 + 0,606 \cdot 10^{-1} \cdot q_v)}{e^{-25(\alpha''_T - 1)}} \cdot K_r \cdot K_d \cdot K_{\text{ст}} \cdot K_{\text{пл}} \cdot K_{\text{оч}}. \quad (2.25)$$

Концентрация бенз(а)пирена в сухих дымовых газах котлов при сжигании природного газа C_r , мкг/м^3 , приведенная к избытку воздуха в дымовых газах $\alpha = 1,4$, рассчитывается по формуле:

$$C_r = \frac{q_{\text{пг}}^{-1,26} (0,0356 + 0,163 \cdot 10^{-3} \cdot q_v)}{e^{-25(\alpha''_T - 1)}} \cdot K_p \cdot K_d \cdot K_{\text{ст}} \cdot K_{\text{пв}}. \quad (2.26)$$

В формулах (2.25) и (2.26): $q_{\text{пг}}$ – теплонапряжение поверхности зоны активного горения, МВт/м^2 ; q_v – теплонапряжение топочного объема, кВт/м^3 (является проектной величиной, определяется из технической документации на котел); e – основание натурального логарифма, математическая константа, $e = 2,71828$; α''_T – коэффициент избытка воздуха в дымовых газах на выходе из топки (при $\alpha''_T > 1,08$ в формулах (2.25) и (2.26) принимать $e^{-25(\alpha''_T - 1)} = 0,135$; K_p , K_d , $K_{\text{ст}}$, $K_{\text{пв}}$ – коэффициенты,

учитывающие влияние рециркуляции, нагрузку котла, ступенчатое сжигание топлива, подачу влаги; $K_{оч}$ – коэффициент, учитывающий увеличение выброса бенз(а)пирена при очистке конвективных поверхностей нагрева на ходу котла, принимается по табл. 2.7.

Таблица 2.7

Величина коэффициента $K_{оч}$

Период между очистками, ч	При дробевой очистке конвективных поверхностей нагрева	При обдувах регенеративных воздухоподогревателей
22...24	1,2	1,1
40...48	1,5	1,25
72	2,0	1,5

Теплонапряжение поверхности зоны активного горения $q_{пг}$ может быть найдено по уравнению:

$$q_{пг} = \frac{Q_H^p \cdot B}{2(a_T + b_T) \cdot z_{яр} \cdot h_{яр} + 1,5 \cdot a_T \cdot b_T}, \quad (2.27)$$

где Q_H^p – низшая теплота сгорания топлива, МДж/кг (МДж/м³);
 B – расход топлива на котел, кг/с (м³/с), (при наличии в топке двухсветного экрана B принимается на одну ячейку); $z_{яр}$ – число ярусов горелок; a_T – ширина топки (в свету), м, (при наличии двухсветного экрана – ширина одной ячейки); b_T – глубина топки (в свету), м; $h_{яр}$ – расстояние по высоте между осями соседних горелок м.

Коэффициент, учитывающий влияние рециркуляции K_p находится по формуле:

$$K_p = 1 + dr, \quad (2.28)$$

где r – степень (доля) рециркуляции дымовых газов; d – коэффициент, характеризующий влияние рециркуляции дымовых газов на выброс бенз(а)пирена, принимается равным: $d = 1$ – при вводе в подтопочные камеры; $d = 4$ – в воздух или отдельный канал горелки; $d = 2$ – в шлицы (сопла) напротив горелок; $d = 2,7$ – в шлицы под горелками.

Коэффициент, учитывающий нагрузку котла K_d , рассчитывается по формуле:

$$K_d = \left(2 - D_{\text{ф}}/D_{\text{н}}\right)^{2,4}, \quad (2.29)$$

где $D_{\text{ф}}$ и $D_{\text{н}}$ – фактическая и номинальная паропроизводительность (нагрузка) котла, кг/с, соответственно.

Коэффициент, учитывающий ступенчатое сжигание топлива $K_{\text{ст}}$, находится по выражению:

$$K_{\text{ст}} = 1 + b\delta, \quad (2.30)$$

где δ – доля воздуха, подаваемая во вторую ступень горения; b – коэффициент, учитывающий воздействие воздуха, подаваемого во вторую ступень горения. При отключении половины горелок верхнего яруса по топливу $b = -1$ (для мазута) и $b = -0,2$ (для газа). Для схемы, реализующей ступенчатое сжигание по «вертикали» $b = 7$. Для схемы, реализующей ступенчатое сжигание по «горизонтали» $b = 2,7$.

Коэффициент, учитывающий подачу влаги $K_{\text{пв}}$ рассчитывается по формуле:

$$K_{\text{пв}} = \exp(-\lambda g), \quad (2.31)$$

где g – водо-топливное отношение при подаче влаги в зону горения; λ – коэффициент, учитывающий воздействие влаги. При вводе в пристенную зону топки и зональном впрыске $\lambda = 15$. При вводе в дутьевой воздух $\lambda = 2$.

Концентрация бенз(а)пирена в сухих дымовых газах котлов при сжигании твердого топлива C_T , мкг/м³, приведенная к избытку воздуха в дымовых газах $\alpha = 1,4$, рассчитывается по формуле:

$$C_T = \frac{AQ_{\text{н}}^{\text{р}}}{e^{1,5\alpha_T''}} K_d K_{\text{зу}}, \quad (2.32)$$

где A – коэффициент, характеризующий конструкцию нижней части топки. При жидком шлакоудалении $A = 0,378$, при твердом шлакоудалении $A = 0,521$; α_T'' – то же, что в (2.25) и (2.26); $Q_{\text{н}}^{\text{р}}$ – то же, что в (2.27); e – то же, что в (2.25) и (2.26); K_d – коэффициент, учитывающий нагрузку котла, определяется по формуле:

$$K_d = \left(D_{\text{ф}} / D_{\text{н}} \right)^{1,1}, \quad (2.33)$$

где $D_{\text{ф}}$ и $D_{\text{н}}$ – то же, что и в (2.29).

Коэффициент, учитывающий степень улавливания бенз(а)пирена золоуловителями $K_{\text{зу}}$ рассчитывается по формуле:

$$K_{\text{зу}} = 1 - \frac{\eta_{\text{зу}} Z}{100}, \quad (2.34)$$

где Z – коэффициент, учитывающий снижение улавливающей способности бенз(а)пирена золоуловителями. Принимается: для сухих аппаратов $Z = 0,7$; для мокрых аппаратов $Z = 0,8$.

2.3.6. Расчет выброса двуокиси углерода

Расчет валового выброса двуокиси углерода за отчетный период M_{CO_2} , (г/с, т) при сжигании твердого (кроме сланцев) и жидкого топлива производится по формуле [26]:

$$M_{\text{CO}_2} = 0,01 B_{\text{нат}} \cdot 3,664 C^p (1 - 0,01 q_4), \quad (2.35)$$

где $B_{\text{нат}}$ – расход натурального твердого или жидкого топлива за отчетный период (г/с, т); C^p – содержание углерода в топливе на рабочую массу, %; q_4 – потери тепла вследствие механической неполноты сгорания твердого и жидкого топлива, %.

Для электростанций, сжигающих сланцы, при расчете выбросов двуокиси углерода необходимо учитывать двуокись углерода, образующуюся при разложении карбонатов. Расчет выбросов производится по формуле:

$$M_{\text{CO}_2} = 0,01 B_{\text{нат}} \cdot \left[3,664 C^p + (\text{CO}_2)_k k \right] (1 - 0,01 q_4), \quad (2.36)$$

где $(\text{CO}_2)_k$ – двуокись углерода карбонатов, %, принимается по [27] и [28]; k – степень разложения карбонатов, принимаемая при слоевом сжигании 0,7, при факельном – 1,0.

Расчет валового выброса двуокиси углерода за отчетный период M_{CO_2} (г/с, т) при сжигании газа производится по формуле:

$$M_{\text{CO}_2} = B_{\text{нат}} \rho_{\text{CO}_2} V_{\text{RO}_2}, \quad (2.37)$$

где ρ_{CO_2} – плотность двуокиси углерода, кг/м^3 , принимаемая равной $1,9768 \text{ кг/м}^3$; V_{RO_2} – объем двуокиси углерода в продуктах сгорания газообразного топлива, $\text{нм}^3/\text{м}^3$:

$$V_{\text{RO}_2} = 0,01 \left[\text{CO}_2 + \text{CO} + \sum m\text{C}_m\text{H}_n \right], \quad (2.38)$$

где CO_2 , CO , C_mH_n – химический состав газообразного (% по объему) топлива по данным анализа.

При отсутствии данных о химическом составе газообразного топлива расчет производится по формуле:

$$M_{\text{CO}_2} = V_{\text{нат}} \rho_{\text{CO}_2} V_{\text{RO}_2}, \quad (2.39)$$

где V_{RO_2} – объем трехатомных газов в продуктах сгорания газообразного топлива, $\text{нм}^3/\text{м}^3$, принимается по [27].

Контрольные вопросы

1. Дайте определение понятия «предельно допустимая концентрация».
2. Объясните, в каких случаях величина ПДК может быть увеличена.
3. Раскройте понятие «рефлекторное действие вредного вещества».
4. Поясните термин «резорбтивное действие вредного вещества».
5. Расскажите, в чем отличие ПДК для атмосферы от ПДК вредного вещества в воздухе рабочей зоны.
6. Раскройте понятие «рабочая зона».
7. Расшифруйте аббревиатуру ОБУВ и объясните, что это такое.
8. Расскажите, какие выбросы загрязняющих веществ подлежат нормированию.
9. Расшифруйте и объясните, что такое *ppm*.
10. Расскажите, когда применяются приборные, а когда расчетные методы определения выбросов.

3. ТРАЕКТОРИЯ ДЫМОВОГО ФАКЕЛА

3.1. Формирование дымового факела

Траектория дымового факела в значительной мере зависит от условий его формирования. Можно выделить три типа таких условий, которые в свою очередь зависят от скорости ветра. При отсутствии ветра или при скоростях ветра близких к нулевым, обычно в пределах до 1–2 м/с, на выходе из одноствольной трубы формируется свободная струя (рис. 3.1). При этом дымовые газы, выходя из трубы, движутся вертикально вверх. Начальная кинетическая энергия (или сила инерции) дымового факела действует в основном на начальном участке дымового факела, а основной подъем при этом будет обеспечиваться всплытием более теплых относительно окружающего воздуха объемов дымового факела. Величина, на которую эти объемы поднимаются, зависит от разницы температур между ними и температурой воздуха.

В пограничном слое атмосферы могут иметь место различные профили температуры воздуха: от сверхадиабатических (падение температуры воздуха с высотой более чем на 1 °C/100 м) до инверсионных (рост температуры с увеличением высоты). В результате могут иметь место случаи, когда разность между температурой окружающего воздуха и средней температурой в дымовом факеле при его подъеме может оставаться постоянной или даже нарастать. В этом случае дымовой факел поднимается на большую высоту, попадает в итоге в верхние слои атмосферы, где под действием жесткого солнечного излучения происходит распад вредных газообразных примесей. Дымовые газы при этом земли не достигают, и дымовая труба экологической опасности не представляет.

Однако могут быть и другие ситуации, когда, например, температура воздуха с высотой заметно увеличивается. В результате температура дымовых газов и окружающего воздуха на какой-то высоте сравниваются, что в итоге приводит к прекращению подъема дымовых газов. А если учесть, что ветер при этом отсутствует, то происходит накопление выбросов в ограниченном пространстве, которые под действием турбулентности атмосферы начинают распространяться во все стороны, в том числе и к земле.

При скоростях ветра более 1 м/с дымовой факел приобретает изгиб, тем больший, чем более сильная скорость ветра. В непосредственной близости от устья дымовой трубы, в результате взаимодействия свободной струи со сносящим потоком, формируется парный вихрь (бифуркация) дымового факела, рис. 3.1, б.

При скоростях ветра порядка 10 м/с и более на начальном участке появляется окутывание дымовой трубы с подветренной стороны собственным дымовым факелом, рис. 3.1, в.



а



б



в

Рис. 3.1. Начальные участки дымового факела: *а* – при отсутствии ветра; *б* – при скорости ветра от 1–2 до 8–10 м/с; *в* – при скорости ветра более 10 м/с

Для каждого из этих случаев используется своя расчетная схема.

Схема взаимодействия дымового факела, изображенного на рис. 3.1, б, и окружающей воздушной массы показана на рис. 3.2.

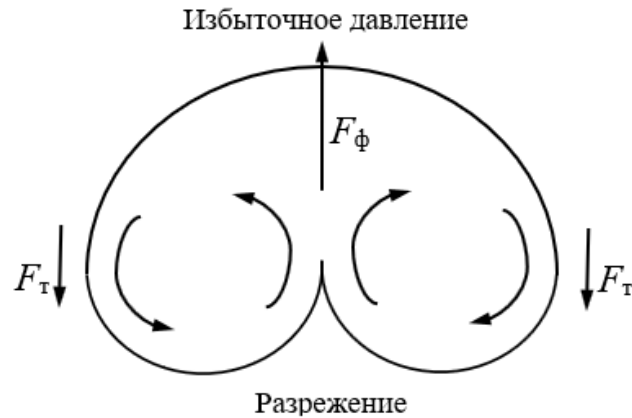


Рис. 3.2. Поперечное сечение дымового факела

В данном случае центральная часть факела за счет сил, действующих в факеле F_ϕ (сил инерции и сил Архимеда), поднимается выше, чем края, за счет их трения о воздух. В результате ветра ось траектории изгибается, из-за трения о воздух по краям факела появляются силы F_T , направленные вниз, и появляется два вихря с противоположной круткой. За счет начальной скорости газов вверху факела появляется давление больше, чем атмосферное, а снизу – меньше. Это приводит к тому, что периферийные частицы дыма снизу опять засасываются в факел.

3.2. Влияние метеорологических условий на распространение дымового факела

3.2.1. Атмосферное давление

Рассмотрим схему, приведенную на рис. 3.3.

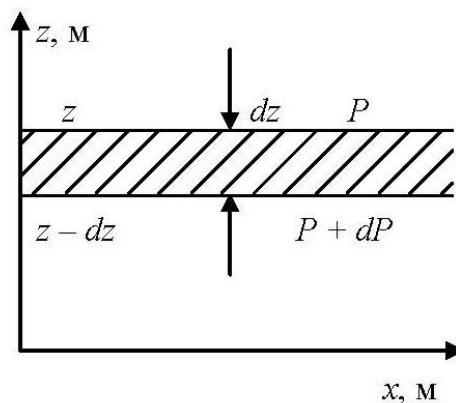


Рис. 3.3. Схема к расчету профиля атмосферного давления

На верхней границе условного выделенного слоя имеется текущее давление P , с которым атмосфера давит на верхнюю границу. На нижнюю границу слоя снизу атмосфера давит с величиной $(P + dp)$.

Запишем условие равновесия для нижней границы слоя:

$$P + dp = P + dG, \quad (3.1)$$

где dG – сила тяжести, с которой масса воздушного столба высотой dz давит сверху на нижнюю границу выделенного слоя. Запишем

$$dG = -gpdz. \quad (3.2)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с^2 . Знак минус появляется из-за того, что при увеличении давления при движении в сторону земли приращение по z отрицательное (см. рис. 3.5).

Подставляем (3.2) в (3.1), сокращаем обе части на P и получаем

$$\frac{dp}{dz} = -g\rho. \quad (3.3)$$

Для воздуха применимо уравнение состояния идеального газа Клайперона – Менделеева [29]:

$$p = \frac{\rho}{\mu} R^* T, \quad (3.4)$$

где μ – молекулярный вес газа; R^* – универсальная газовая постоянная, численно равна работе (в эргах), которую может совершить 1 моль газа при нагревании на 1° К при постоянном давлении, $R^* = 8,3143 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К})$; ρ – плотность газа, кг/м^3 ; T – абсолютная температура воздуха, К .

Если заменить плотность газа на удельный объем $v = 1/\rho$ и учесть, что для сухого воздуха $\mu = 28,966 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$, получим

$$pv = RT, \quad (3.5)$$

где $R = 2,87 \cdot 10^2 \text{ Дж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К})$.

Учитывая, что $v = 1/\rho$, получаем

$$\rho = p/RT. \quad (3.6)$$

Подставляя (3.6) в (3.3) , получим

$$\frac{dp}{dz} = -\frac{gp}{RT} . \quad (3.7)$$

Примем, что температура воздуха во всем слое $T = \text{Const}$, и разделим переменные в уравнении (3.7), тогда

$$\frac{dp}{p} = -\frac{g}{RT} dz . \quad (3.8)$$

Проинтегрируем выражение (3.8)

$$\int_{p_0}^p \frac{dp}{p} = -\frac{g}{RT} \int_0^z dz . \quad (3.9)$$

Получим

$$\ln \frac{p}{p_0} = -\frac{gz}{RT} , \quad (3.10)$$

откуда

$$\frac{p}{p_0} = e^{-\frac{gz}{RT}} \quad (3.11)$$

и

$$p = p_0 e^{-\frac{gz}{RT}} , \quad (3.12)$$

где p_0 – давление на уровне земли, z – расстояние от земли по вертикали.

Из (3.12) следует, что давление на любом уровне равно весу всего столба атмосферы, находящегося над данным уровнем.

При температуре 0°C и давлении 1000 мбар барическая ступень равна 8 м/мбар. Стало быть, у земной поверхности нужно подняться примерно на 8 м, чтобы давление упало на 1 мбар. В теплом воздухе, где барическая ступень больше, давление падает с высотой медленнее, чем в холодном воздухе. Поэтому на высотах давление в теплом и холодном воздухе становится неодинаковым: в теплом воздухе оно будет выше, чем в холодном. Иными словами, теплые области в атмосфере являются в высоких слоях областями высокого давления, а холодные области – областями низкого давления.

В многолетнем среднем для Европы давление на уровне моря равно 1 014 мбар, на высоте 5 км – 538 мбар, 10 км – 262 мбар, 15 км – 120 мбар и 20 км – 56 мбар. На уровне 5 км давление почти вдвое ниже, чем на уровне моря, на уровне 10 км – почти в четыре раза, на уровне 15 км – почти в 8 раз и на уровне 20 км – в 18 раз.

3.2.2. Профиль скорости ветра в атмосфере

Касательные напряжения для турбулентного потока, $\text{кг}/(\text{м} \cdot \text{с}^2)$, могут быть представлены в виде [30]:

$$\tau = \rho l^2 \left(\frac{du}{dz} \right)^2. \quad (3.13)$$

Здесь ρ – плотность воздуха, $\text{кг}/\text{м}^3$; l – длина пути перемешивания, м; $\partial u / \partial z$ – градиент скорости ветра по высоте.

Учитывая, что вертикальная составляющая коэффициента турбулентности k_z , $\text{м}^2/\text{с}$, для приземного слоя атмосферы записывается как

$$k_z = l^2 \left(\frac{du}{dz} \right), \quad (3.14)$$

получим:

$$\tau = \rho k_z \left(\frac{du}{dz} \right). \quad (3.15)$$

Можно принять, что напряжение трения τ в приземном слое воздуха по высоте остается постоянным [31].

Примем, что в пределах слоя высотой z_1 коэффициент турбулентности изменяется линейно от нуля до максимума k_z^m . Тогда его текущее значение на уровне $z < z_m$ будет равно:

$$k_z = k_z^m \left(\frac{z}{z_m} \right). \quad (3.16)$$

Значения (3.16) подставим в (3.15), а все постоянные величины перенесем в левую часть, получим:

$$\frac{\tau z_m}{k_z^m \rho} = z \frac{du}{dz}. \quad (3.17)$$

Учитывая, что $\tau = \text{const}$, вся левая часть также будет постоянной величиной. Обозначим ее как

$$\frac{\tau z_m}{k_z^m \rho} = \frac{1}{A}. \quad (3.18)$$

Подставим это значение в (3.17) и разделим переменные, получим

$$Adu = \frac{dz}{z}. \quad (3.19)$$

Проинтегрируем выражение (3.19) по z от z_0 до z_1 , где z_0 – абсолютная шероховатость подстилающей поверхности, м. Тогда скорость ветра на этих уровнях будет изменяться от 0 до текущего значения u :

$$Au = \ln \frac{z}{z_0}. \quad (3.20)$$

Если аналогичным образом уравнение (3.19) проинтегрировать от уровня z_0 до значения z_1 , на котором известна величина скорости ветра u_1 , то получим

$$Au_1 = \ln \frac{z}{z_1}. \quad (3.21)$$

Поделив почленно (3.20) на (3.21), получим

$$\frac{u}{u_1} = \frac{\ln \frac{z}{z_0}}{\ln \frac{z_1}{z_0}}, \quad (3.22)$$

откуда

$$u = u_1 \frac{\ln \frac{z}{z_0}}{\ln \frac{z_1}{z_0}}. \quad (3.23)$$

Величина z_0 зависит от вида поверхности и для условий, характерных для ТЭС в Европейской части территории России, принимается равной 10 см.

Таким образом, приземный слой атмосферы, в котором приближенно может приниматься закон линейного нарастания вертикальной составляющей коэффициента турбулентного обмена, характеризуется логарифмическим профилем скорости ветра. Для конвективных условий вертикальная составляющая коэффициента турбулентного обмена на верхней границе приземного слоя составляет $k_z = 5 \dots 20 \text{ м}^2/\text{с}$. При больших высотах k_z остается примерно постоянным. На нижней границе, у земли, его можно принимать равным коэффициенту молекулярной диффузии (кинематической вязкости воздуха).

Из натуральных наблюдений известно, что такой закон изменения скорости ветра сохраняется до высот, больших, чем слой высотой z_1 , в котором коэффициент турбулентности k_z^m изменяется линейно от нуля до максимума [31].

3.2.3. Температурный градиент в атмосфере

Вертикальным градиентом температуры воздуха называется его изменение на каждые 100 м по высоте:

$$\gamma = -\frac{\Delta t \text{ } ^\circ\text{C}}{100 \text{ м}}. \quad (3.24)$$

Вертикальный градиент считается положительным при падении температуры воздуха с высотой. Если температура воздуха с высотой растет, то имеет место температурная инверсия, если остается постоянной, то изотермия.

Процессы, происходящие в атмосфере, близки к адиабатическим, т. е. они происходят без теплообмена с окружающей средой. Если порция воздуха движется вверх, то она попадает в зону с меньшим давлением и расширяется, затрачивая для производства работы расширения свою внутреннюю энергию. Температура воздуха при этом падает. При опускании воздуха температура его растет.

Адиабатические изменения состояния в идеальном газе с достаточной точностью применимы к сухому и к ненасыщенному влажному воздуху.

Запишем градиент температуры в виде:

$$\frac{dt}{dz} = \frac{dp}{dz} \frac{dt}{dp}. \quad (3.25)$$

Из 1-го закона термодинамики следует, что если производимая системой работа связана только с изменением объема, то можно записать

$$dQ = dI - Vdp. \quad (3.26)$$

Для адиабатического процесса это выражение приобретает вид

$$dI = Vdp. \quad (3.27)$$

Поделив обе части уравнения на dt , получим

$$\frac{dI}{dt} = V \frac{dp}{dt}. \quad (3.28)$$

Если процесс протекает при давлении в системе, равном давлению окружающей среды, то производная $dI/dt = c_p$, т. е. равна теплоемкости воздуха при постоянном давлении.

Отсюда можно записать:

$$\frac{dt}{dp} = \frac{V}{c_p}. \quad (3.29)$$

В (3.25) подставим значение (dp/dz) из (3.3), а (dt/dp) – из (3.29) и, учитывая, что для единичного объема $v \cdot \rho = 1$, получим:

$$\frac{dt}{dz} = -\frac{g}{c_p}. \quad (3.30)$$

Принимаем, что ускорение свободного падения $g = 9,8 \text{ м/с}^2$, а теплоемкость воздуха при постоянном давлении $c_p = 1000 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$, получим, что

$$\frac{dt}{dz} = -0,0098 \text{ К/м или } \frac{dt}{dz} = -0,98 \text{ К/100 м}. \quad (3.31)$$

Изменение температуры сухого воздуха и воздуха с ненасыщенным водяным паром при его адиабатическом вертикальном перемещении на 100 м называется сухоадиабатическим вертикальным градиентом температуры γ_a :

$$\gamma_a = -\frac{dt}{dz} = \frac{0,98 \text{ К}}{100 \text{ м}}. \quad (3.32)$$

В практических расчетах принимают $\gamma_a = 1 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ м}$.

Сухоадиабатический закон можно выразить также уравнением Пуассона:

$$\frac{T}{T_0} = \left(\frac{p}{p_0} \right)^{0,288}. \quad (3.33)$$

Вертикальный температурный градиент сильно сказывается на возникновении или затухании атмосферной турбулентности. Рассмотрим рис. 3.4.

Пусть на уровне z располагается объем воздуха с температурой t_z (показан кружком). Примем, что в рассматриваемом слое имеет место линейное распределение температуры воздуха по высоте. В этом случае возможны следующие варианты распределения температуры:

а) линия 1 – с градиентом температуры, равным сухоадиабатическому: $\gamma = \gamma_a$;

б) линия 2 – с доадиабатическим градиентом температуры: $\gamma_a > \gamma > 0$;

в) линия 3 – с нулевым градиентом температуры: $\gamma = 0$;

г) линия 4 – с инверсионным градиентом температуры: $\gamma < 0$;

д) линия 5 – с сверхадиабатическим градиентом температуры: $\gamma > \gamma_a$.

Допустим, что в атмосфере имеет место доадиабатический градиент атмосферы, как это чаще всего и бывает. Тогда, если выделенный объем воздуха получил внешний импульс, в результате которого начал двигаться вверх, температура его будет изменяться по линии 1 и на уровне $z = z_1$ его температура станет меньше температуры окружающего воздуха ($t_1 < t_2$), так как при доадиабатическом градиенте температура окружающего воздуха будет меняться по линии 2. В результате плотность этого объема станет больше плотности окружающего воздуха и появится сила, направленная против движения выделенного объема. Возникшая в воздухе пульсация будет затухать.

То же самое произойдет, если в результате внешнего импульса выделенный объем воздуха начал двигаться вниз. Температура его будет также изменяться по линии 1 и на уровне $z = z_2$ его температура станет больше температуры окружающего воздуха ($t'_1 > t'_2$). В результате плотность этого объема станет меньше плотности окружающего воздуха и появится сила, направленная вверх, т. е. опять против движения выделенного объема. В результате пульсация также будет затухать.

Такое состояние атмосферы называется устойчивым.

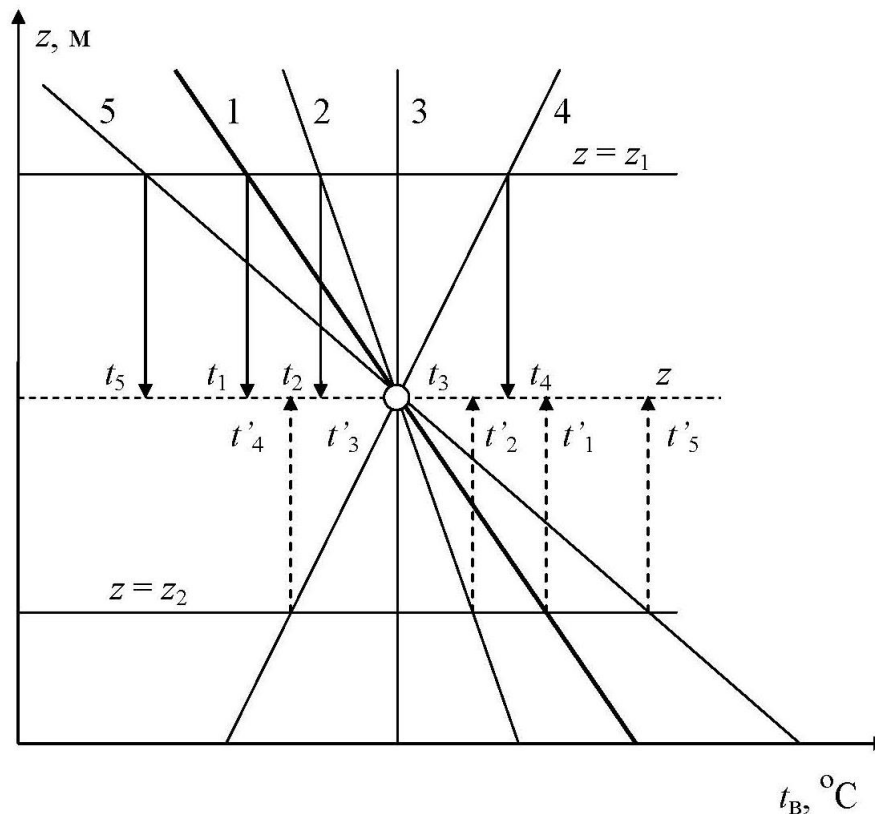


Рис. 3.4. Влияние температурного градиента на атмосферную турбулентность

Такой же результат, только с более выраженным эффектом, получим, если температура воздуха изменяется по линиям 3 или 4. Если температура воздуха меняется по линии 4, то имеет место сильная устойчивость атмосферы, когда все вносимые в слой воздуха пульсации быстро затухают. Если в такой слой попадает дымовой факел, то он очень медленно рассеивается в воздухе, в результате чего дымовой шлейф виден на большие расстояния (десятки километров). Дымовой факел при этом достигает земли на больших расстояниях (применительно к дымовым трубам современных ТЭС – до сотен километров). За счет флуктуации направления ветра дым при таких расстояниях рассеивается на огромных территориях, в результате чего его концентрация у земли практически не ощутима.

Другой результат получается, если в атмосфере имеет место сверхадиабатический градиент (линия 5). В этом случае, если выделенный объем воздуха под действием внешней силы начнет двигаться вверх, его температура будет изменяться по адиабате, т. е. снижаться на 1 К на каждые 100 м подъема. А температура окружающего воздуха в этом случае будет снижаться еще быстрее, и наш объем окажется теплее

окружающего воздуха на новом уровне ($t_1 > t_5$) (см. рис. 3.4). В результате более теплый воздух будет стремиться продолжить движение и начальная пульсация начнет развиваться до тех пор, пока какая-либо сила не толкнет этот объем вниз.

Если начальный импульс был направлен вниз, то выделенный объем окажется холоднее окружающего воздуха ($t'_1 > t'_5$) (см. рис. 3.4). Пульсация получит дальнейшее развитие. Таким образом, в атмосфере создаются условия, когда вносимые пульсации не затухают, а развиваются. Турбулентность атмосферы увеличивается, дымовой факел быстро достигает земли, где могут создаваться высокие концентрации.

Изменение температуры воздуха, связанное с изменением высоты, на которой он располагается, или с изменением давления воздуха на заданном уровне, не свидетельствует об изменении количества заключенной в данном объеме энергии. Об изменении количества энергии свидетельствует так называемая потенциальная температура Θ . Потенциальной называется температура воздуха, если ее сухадиабатически привести к давлению 1 000 мбар (или 760 мм рт. ст.):

$$\Theta = T_0 \left(\frac{1000}{p_0} \right)^{0,288}. \quad (3.34)$$

Здесь T_0 и p_0 – температура и давление воздуха.

Если известен уровень расположения рассматриваемого объема воздуха относительно уровня моря z и его температура T_z , то потенциальная температура может быть найдена как

$$\Theta = T_z + \gamma_a z. \quad (3.35)$$

С адиабатическим подъемом влажного ненасыщенного воздуха связано такое важное изменение, как приближение его к состоянию насыщения. Температура воздуха при его подъеме понижается; поэтому на какой-то высоте достигается насыщение. Эта высота называется уровнем конденсации.

При дальнейшем подъеме влажный насыщенный воздух охлаждается иначе, чем ненасыщенный. В нем происходит конденсация, а при конденсации выделяется в значительных количествах скрытая теплота парообразования, или теплота конденсации. Выделение этой теплоты замедляет понижение температуры воздуха при подъеме.

Поэтому в поднимающемся насыщенном воздухе температура падает уже не по уравнению Пуассона, а по влажноадиабатическому закону. Она падает тем медленнее, чем больше влагосодержание воздуха в состоянии насыщения (что в свою очередь зависит от температуры и давления). На каждые 100 м подъема насыщенный воздух при давлении 1000 мбар и температуре 0 °С охлаждается на 0,66°С, при температуре +20°С – на 0,44°С и при температуре – 20°С (минус 20) – на 0,88°С. При более низком давлении падение температуры соответственно меньше. Падение температуры в насыщенном воздухе при подъеме его на единицу высоты (100 м) называют влажноадиабатическим градиентом.

При очень низких температурах, которые получает воздух при подъеме в высокие слои атмосферы, водяного пара в нем остается немного и выделение теплоты конденсации поэтому также мало. Падение температуры при подъеме в таком воздухе приближается к падению в сухом воздухе. Иначе говоря, влажноадиабатический градиент при низких температурах приближается по величине к сухоадиабатическому.

При опускании насыщенного воздуха процесс может происходить по-разному в зависимости от того, содержит ли воздух жидкие продукты конденсации (капельки и кристаллы) или они уже целиком выпали из воздуха в виде осадков.

Если в воздухе нет продуктов конденсации, то воздух, как только температура в нем начнет при опускании расти, сразу станет ненасыщенным. Поэтому воздух, опускаясь, будет нагреваться по сухоадиабатическому закону, т. е. на 1 °С/100 м. Если же в воздухе есть капельки и кристаллы, то они при опускании и нагревании воздуха будут постепенно испаряться. При этом часть тепла воздушной массы перейдет в скрытую теплоту парообразования, и потому повышение температуры при опускании замедлится. В результате воздух останется насыщенным до тех пор, пока все продукты конденсации не перейдут в газообразное состояние. А температура в нем будет в это время повышаться по влажноадиабатическому закону: не на 1 °С/100 м, а на меньшую величину – именно на такую, на какую понизилась бы температура в восходящем насыщенном воздухе при тех же значениях температуры и давления.

Представим себе, что влажный ненасыщенный воздух сначала поднимается. Его температура при этом падает сначала по сухоадиабатическому закону; затем, после того как достигнут уровень конденсации, – по влажноадиабатическому закону. Допустим также, что вся вода,

выделяющаяся при конденсации, сразу же выпадает из воздуха в виде осадков. Допустим затем, что, достигнув некоторой высоты, воздух начинает опускаться. Так как продуктов конденсации в нем нет, то он будет при этом нагреваться по сухадиабатическому закону. Легко рассчитать, что на прежний уровень воздух придет с температурой более высокой, чем та, которая была в нем первоначально.

Рассматриваемая масса воздуха совершила необратимый процесс. Хотя она вернулась на прежний уровень, под прежнее давление, она не вернулась в исходное состояние: ее конечная температура оказалась выше, чем была начальная. Такой процесс называется псевдоадиабатическим.

Обычно в пограничном слое воздуха температура значительно превышает температуру точки росы (влажность составляет 50–60 %). Точка росы может достигаться, например летом, при резком ночном похолодании примерно до 10 °С. В этом случае на почве выпадает роса. Но и в этом случае в воздухе уже на высоте нескольких метров температура воздуха, как правило, остается выше температуры точки росы.

3.2.4. Определение величины турбулентности атмосферы

Турбулентное состояние в слое воздуха достаточно полно может быть охарактеризовано средним градиентом температуры $\partial t / \partial z$ и средним градиентом скорости ветра $\partial u / \partial z$ в этом слое, обобщенным в числе Ричардсона:

$$Ri = \frac{g \left(\frac{dt}{dz} \right)}{T \left(\frac{du}{dz} \right)^2}, \quad (3.36)$$

где g – ускорение силы тяжести, м/с²; T – средняя температура воздуха в слое, К.

Согласно [31, 33] существует зависимость:

$$k_z = k_{1p} \frac{z}{z_1} \sqrt{1 - Ri}. \quad (3.37)$$

Здесь k_{1p} – значение k_z на единичной высоте z_1 при равновесных условиях; Ri – среднее по слою число Ричардсона.

На практике чаще применяется упрощенная модель Юдина и Швеца:

$$\begin{aligned} k_z &= \nu + k_1 \frac{z}{z_1} \quad \text{при } z \leq h; \\ k_z &= \nu + k_1 \frac{h}{z_1} \quad \text{при } z > h, \end{aligned} \quad (3.38)$$

где h – высота приземного слоя воздуха, м.

В том случае, если отсутствует возможность измерять градиенты температуры и скорости ветра непосредственно в пограничном слое, тогда турбулентное состояние (класс устойчивости) атмосферы оценивается по наземным данным. А чтобы повысить вероятность такого прогноза для более высоких слоев воздуха, вводятся дополнительные данные из сети метеорологических наблюдений.

3.3. Траектория и подъем дымового факела

3.3.1. Эффективная высота дымовой трубы

Кроме геометрической высоты дымовой трубы различают еще эффективную высоту трубы. Эффективная высота трубы – это такая высота дымовой трубы, которая потребовалась бы для обеспечения тех же приземных концентраций выбрасываемых вредных веществ, если бы отсутствовал подъем дымовых газов над ее устьем. Однако применительно к дымовым трубам ТЭС этот подъем имеет место и зачастую составляет величину, соизмеримую с геометрической высотой трубы.

На рис. 3.5 приведена схема распространения дымового факела. Из дымовой трубы геометрической высотой H_r , м, вертикально вверх, в направлении оси z выбрасываются с начальной скоростью w , м/с, нагретые до температуры t_r , °С, уходящие дымовые газы. В том случае, если при этом имеет место ветер, скорость которого направлена вдоль поверхности земли (ось x), то дымовой факел приобретает изогнутую форму. Средняя линия факела, обозначенная на рис. 3.5 пунктиром и ограниченная точками 1 и 2, на начальном участке продолжает подниматься, что является результатом начальной скорости выхода дымовых газов и начального его перегрева относительно окружающего воздуха.

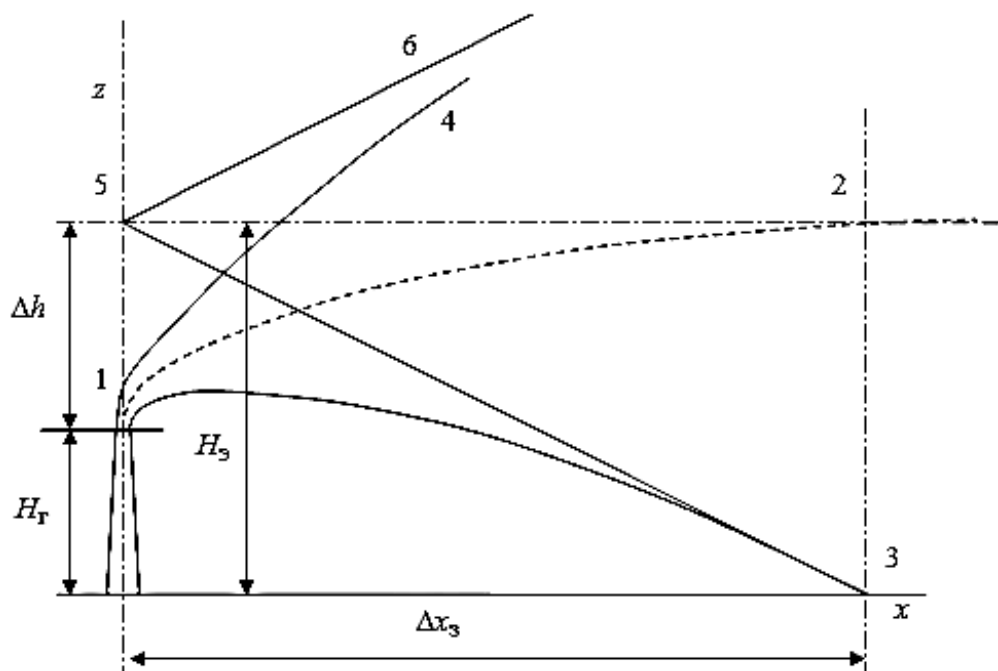


Рис. 3.5. Схема распространения дымового факела

Одновременно с подъемом средней линии дымового факела происходит раскрытие его границ: линия 1–4 – верхняя граница дымового факела, линия 1–3– нижняя граница.

В том случае, если турбулентные характеристики атмосферы во всем слое рассеяния дымового факела одинаковы, то скорость раскрытия границ тоже будет одинаковой. Принимая, что дымовой факел состоит из неоседающей примеси, а достигает земли исключительно за счет перемешивания с окружающим воздухом, верхняя граница факела может неограниченно подниматься вверх. Нижняя граница с такой же скоростью будет отходить от средней линии траектории вниз и двигаться в направлении земной поверхности.

Видимость границ траектории зависит от концентрации газов и их состава вблизи этой границы. Длина видимой части границы в основном зависит от количества водяных паров в дымовом факеле и интенсивности турбулентного перемешивания в атмосфере. Чем больше паров воды и чем меньше интенсивность турбулентности атмосферы, тем более длинными становятся видимые границы дымового факела. Видимая часть траектории дымового факела может меняться в широких пределах, от десятков метров до десятков километров. На рисунке нижняя граница факела показана условно видимой до достижения ее земной поверхностью.

Так как скорость перемещения частиц дыма к земле за счет турбулентных пульсаций в атмосфере имеет конечную величину, то непосредственно рядом с дымовой трубой образуется чистая зона, или зона переброса дымового факела Δx_z (рис. 3.5). Величина зоны переброса может составлять от сотен метров до нескольких, а иногда и до десятков километров.

Для упрощения расчетов приземных концентраций описанную реальную схему распространения выбросов обычно заменяют условной. Реальная дымовая труба при этом заменяется на условный точечный источник пассивной примеси.

Основным условием такой замены является обеспечение правильных результатов расчета в зоне наиболее высоких приземных концентраций, создаваемых дымовой трубой.

При переходе к условному источнику принимается: температура дымовых газов равна температуре окружающего воздуха, вертикальная составляющая скорости дымовых газов отсутствует (дымовые газы выходят горизонтально в направлении скорости ветра и со скоростью, равной скорости ветра). Это приводит к тому, что подъем факела над условной трубой отсутствует и при движении дымового факела имеет место только его рассеивание за счет атмосферных пульсаций. Количество газов и количество содержащихся в них примесей остается прежним.

Для того чтобы при этих условиях были получены правильные величины приземных концентраций, высота дымовой трубы должна быть увеличена до эффективной высоты дымовой трубы H_z (рис. 3.5).

Эта высота может быть получена из следующих соображений. Принимаем, что для высоких дымовых труб нижняя граница дымового факела при приближении к земле уже практически не связана с его средней линией и движется только под действием скорости ветра и атмосферной турбулентности. Если, как мы уже предположили, интенсивность турбулентности во всем слое рассеивания дымового факела постоянна, то и траектория нижней границы дымового факела у земли будет представлять собой прямую линию. Если продолжить эту линию от земли до пересечения ее с осью z , то получим траекторию нижней границы при отсутствии воздействия на факел начальных импульсов скорости выхода и температуры, т. е. как раз для тех условий, которым удовлетворяет условный источник.

Таким образом, если поместить в полученную точку пересечения данной прямой и вертикали z (точка 5) условный источник, то в зоне приближения дымовых газов к земле мы получим примерно такие же условия, как для реального источника.

Разность между эффективной и геометрической высотой называется подъемом факела над устьем дымовой трубы Δh , м. Величина Δh может составлять заметную величину по сравнению с высотой дымовой трубы и даже превосходить ее и зависит не только от метеоусловий, но и от режима работы станции.

Отсюда можно сформулировать геометрическое условие определения подъема дымового факела над устьем трубы как разность между высотой средней линии траектории дымового факела над точкой касания земли нижней границей дымового факела и геометрической высотой дымовой трубы.

3.3.2. Подъем дымового факела при отсутствии ветра

При отсутствии ветра дымовые газы, выходя из трубы, движутся вертикально вверх. Начальная кинетическая энергия (или сила инерции) дымового факела действует в основном на начальном участке дымового факела, а основной подъем при этом будет обеспечиваться всплытием более теплых относительно окружающего воздуха объемов дымового факела. Величина, на которую эти объемы поднимутся, зависит от разницы температур между ними и температурой воздуха.

В пограничном слое атмосферы могут иметь место различные профили температуры воздуха, от сверхадиабатических (падение температуры воздуха с высотой более чем на $1\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$) до инверсионных (рост температуры с увеличением высоты). В результате могут иметь место случаи, когда разность между температурой окружающего воздуха и средней температурой в дымовом факеле при его подъеме может оставаться постоянной или даже нарастать. В этом случае дымовой факел поднимается на многие километры, попадает в итоге в верхние слои атмосферы, где под действием жесткого солнечного излучения происходит распад вредных газообразных примесей. Дымовые газы при этом земли не достигают и дымовая труба экологической опасности не представляет.

Однако могут быть и другие ситуации, когда, например, температура воздуха с высотой заметно увеличивается. В результате температура дымовых газов и окружающего воздуха на какой-то высоте сравниваются, что в итоге приводит к прекращению подъема дымовых газов.

А если учесть, что ветер при этом отсутствует, то происходит накопление выбросов, которые под действием турбулентности атмосферы начинают распространяться во все стороны, в том числе и к земле.

В случае достаточной продолжительности таких условий (несколько суток) у земли появятся значительно (в несколько раз) большие, чем обычно (рассчитанные по [32]), концентрации вредных веществ. Такие условия называются особо опасными и на настоящее время они еще мало изучены.

Предлагаемое решение позволяет учесть при произвольном профиле скорости ветра реальный (произвольный) температурный профиль в пограничном слое атмосферы.

При решении задач о турбулентной струе считается, что длина пути перемешивания пропорциональна ширине струи, а приращение ширины зоны перемешивания пропорционально поперечной пульсации скорости. В результате получается, что ширина зоны перемешивания пропорциональна расстоянию от точки соприкосновения потоков до рассматриваемого сечения.

Эта зона перемешивания представляет собой пограничный слой, профиль которого в масштабе половины ширины струи на половине глубины профиля скоростей является универсальным. В результате линейного нарастания толщины пограничного слоя поле постоянных (начальных) скоростей в поперечном сечении свободной струи уменьшается, а в переходном сечении сходит на нет. Пограничный слой занимает все поперечное сечение, после которого осевая скорость в струе начинает уменьшаться, а отношение на основном участке струи средней скорости по площади к осевой становится постоянной величиной.

Если известно, как изменяется площадь поперечного сечения струи и профиль скорости в этом сечении, то скорость на оси струи можно найти из условия сохранения количества движения массы газов, проходящей в единицу времени через поперечное сечение (секундной массы) [33]:

$$J = \rho \int_0^F u^2 dF = \text{const}, \quad (3.39)$$

где ρ – плотность газов, кг/м^3 ; u – текущее значение скорости, м/с ; F – площадь поперечного сечения, м^2 . Количество движения в струе J при этом будет иметь размерность силы, Н.

Одно из наиболее полных исследований струй проведено в [34]. В несколько упрощенном виде теория свободных струй изложена в [35], где приведены достаточно простые выражения для расчета свободных струй.

В соответствии с этим, для расчета средней по площади скорости $u_{\text{ср}}$ в пределах начального участка изотермической струи предлагается выражение:

$$u_{\text{ср}} = \left(\frac{1 + 0,0396s + 0,00278s^2}{(1 + 0,14s)^2} \right) u_0, \quad (3.40)$$

а в пределах основного участка

$$u_{\text{ср}} = 3,2/s. \quad (3.41)$$

Здесь $s = z/r_0$, где z – расстояние от устья трубы до расчетного сечения, м; r_0 – радиус устья дымовой трубы; u_0 – скорость выхода газов из дымовой трубы, м/с.

Между начальным и основным участком находится переходное сечение. Угол раскрытия струи на начальном участке принимается $\gamma_1 = 8^\circ$, на основном $\gamma_2 = 12,4^\circ$ (рис. 3.6). Расстояние до переходного сечения составляет $z_{\text{п}} = 12,4r_0$. Зная среднюю скорость $u(z)$ и площадь поперечного сечения $f(z)$ находим текущий объемный расход газовой-душной смеси $V(z)$:

$$V(z) = u(z)f(z). \quad (3.42)$$

Для неизотермической струи начальный участок рассчитывается по формулам изотермической струи, а на основном участке средняя скорость рассчитывается по формуле:

$$u_{\text{ср}} = \frac{3,2}{s} \sqrt{K \frac{T_{\text{окр}}}{T_0}}, \quad (3.43)$$

где $T_{\text{окр}}$ – температура окружающего воздуха на уровне устья трубы, К; T_0 – температура дымовых газов на выходе из устья трубы, К.

Коэффициент K находится по формуле:

$$K = \left(1 + 0,14 \cdot \text{Ar} \cdot s^2 \sqrt{\frac{T_0}{T_{\text{окр}}}} \right)^{2/3}, \quad (3.44)$$

где Ar – критерий Архимеда, определяется как

$$Ar = 9,81r_0 \left(\frac{T_0 - T_{\text{окр}}}{T_{\text{окр}} \cdot u_0^2} \right). \quad (3.45)$$

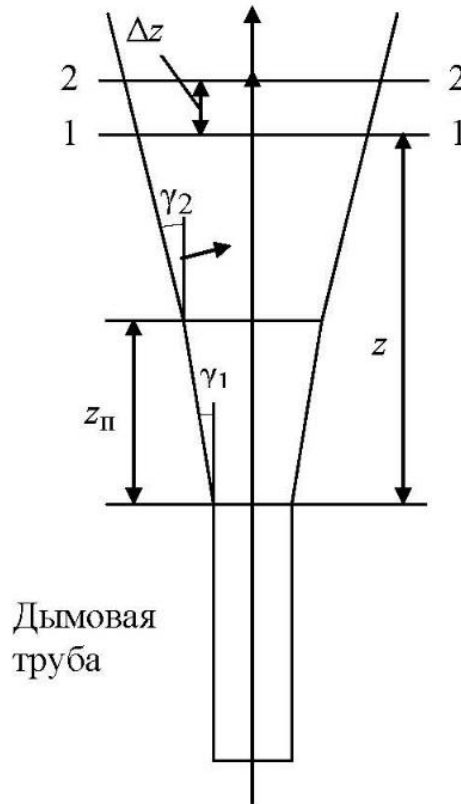


Рис. 3.6. Схема дымового факела при отсутствии ветра

Если известны объемные расходы V_1 и V_2 в струе в сечениях 1–1 и 2–2 (см. рис. 3.6), а также температуры смеси газов T_1 в сечении 1–1 и окружающего воздуха $T_{\text{окр}}$ на участке струи 1–2, то из уравнений материального и теплового балансов можно найти среднюю температуру в струе в сечении 2–2. Сразу учтем охлаждение газозоудушной смеси на участке 1–2 за счет адиабатического расширения при уменьшении атмосферного давления при подъеме (1 °C на 100 м), получим

$$T_2 = \frac{V_2 T_{\text{окр}}}{V_2 - V_1 \left(1 - \frac{T_{\text{окр}}}{T_1} \right)} - 0,01 \left(\frac{V_1}{V_2} \right) \Delta z. \quad (3.46)$$

При расчете контролируется содержание в струе избыточного тепла Q , (кг·град)/с:

$$Q = m(t_{\text{ГВ}} - t_{\text{В}}), \quad (3.47)$$

где $t_{\text{ГВ}}$ и $t_{\text{В}}$ – средняя температура газозвушной смеси в струе и температура окружающего воздуха на уровне текущего сечения струи соответственно, °С.

Примем, что подъем дымовых газов в струе будет продолжаться до тех пор, пока не появится противоположно направленная и равная силе инерции сила Архимеда. Сила инерции для массы газов $F_{\text{и}}$, Н, расположенных на участке Δz , находится как произведение массы газозвушной смеси m и ускорения a на этом участке:

$$F_{\text{и}} = ma. \quad (3.48)$$

Если известны средние скорости u_1 (сечение 1–1) и u_2 (сечение 2–2), то ускорение a на этом участке составит:

$$a = \frac{(u_1 - u_2)(u_1 + u_2)}{2\Delta z}. \quad (3.49)$$

При прекращении подъема $u_2 = 0$. Тогда сила инерции в струе относительно неподвижного окружающего воздуха при условии его полного торможения в пределах участка Δz составит:

$$F_{\text{и}} = \frac{mu_1^2}{2\Delta z}. \quad (3.50)$$

Сила Архимеда $F_{\text{а}}$, Н, для участка струи имеет вид:

$$F_{\text{а}} = gV(\rho_{\text{окр}} - \rho_1), \quad (3.51)$$

где $\rho_{\text{окр}}$ и ρ_1 – плотность окружающего воздуха и газозвушной смеси в струе в текущем сечении; V – объем струи от устья трубы до текущего сечения, м³; g – ускорение свободного падения, м/с².

Существующие формулы дают бесконечный подъем даже изотермической струи, если не учитывать охлаждение газов при их подъеме за счет адиабатического расширения. Однако этот фактор следует учитывать, при этом температура газов внутри струи оказывается ниже температуры окружающего воздуха и появляется направленная вниз сила Архимеда.

Для сравнения результатов с имеющимися теоретическими решениями рассмотрим в качестве примера вариант для изотермической струи с учетом адиабатического охлаждения газов при подъеме: диаметр устья трубы $D = 6$ м; температура газов в устье трубы $t_T = 0$ °С; скорость выхода газов $u = 25$ м/с; температура воздуха $t_B = 0$ °С и постоянна во всей зоне подъема факела (температурный градиент $\gamma = 0$).

На рис. 3.7 показаны сила инерции движущейся массы газов факела и сила Архимеда с обратным знаком, которая появляется при охлаждении газов при их адиабатическом расширении, кН.

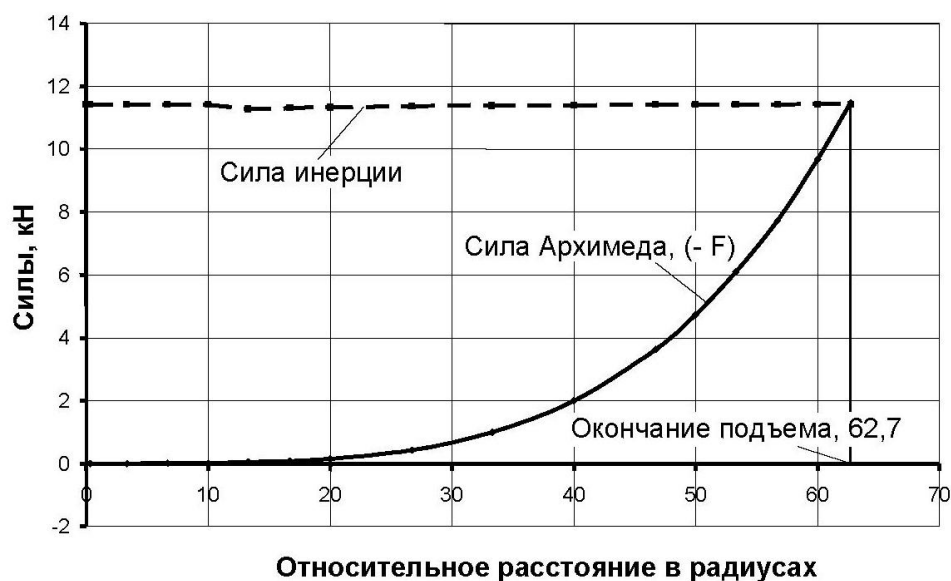


Рис. 3.7. Определение величины подъема факела

На рис. 3.7 в соответствии с [33] имеет место постоянство количества движения секундной массы газов в поперечном сечении струи с учетом профиля скорости в пограничном слое по формуле Шлихтинга:

$$\frac{u - u_H}{u_M - u_H} = f(\eta) = (1 - \eta^{3/2})^2, \quad (3.52)$$

где $\eta = y/b$ — безразмерная координата, которая отсчитывается от внутренней границы струи; b — ширина пограничного слоя.

По оси абсцисс на рис. 3.7 отложено вертикальное расстояние от устья трубы до расчетного сечения. Из рисунка видно, что подъем газов в этом случае не может быть больше 62,7 радиусов или 188 м. Если адиабатическое охлаждение газов при подъеме не учитывать, то получится, что подъем стремится к бесконечно большой величине.

На рис. 3.8 приведена зависимость относительного расхода в струе от относительного расстояния. В данном случае кривая одинакова как для массового, так и для объемного расхода. Учет адиабатического охлаждения газов на относительном массовом расходе практически не сказывается. На этом же рисунке приведено и относительное изменение радиуса струи.

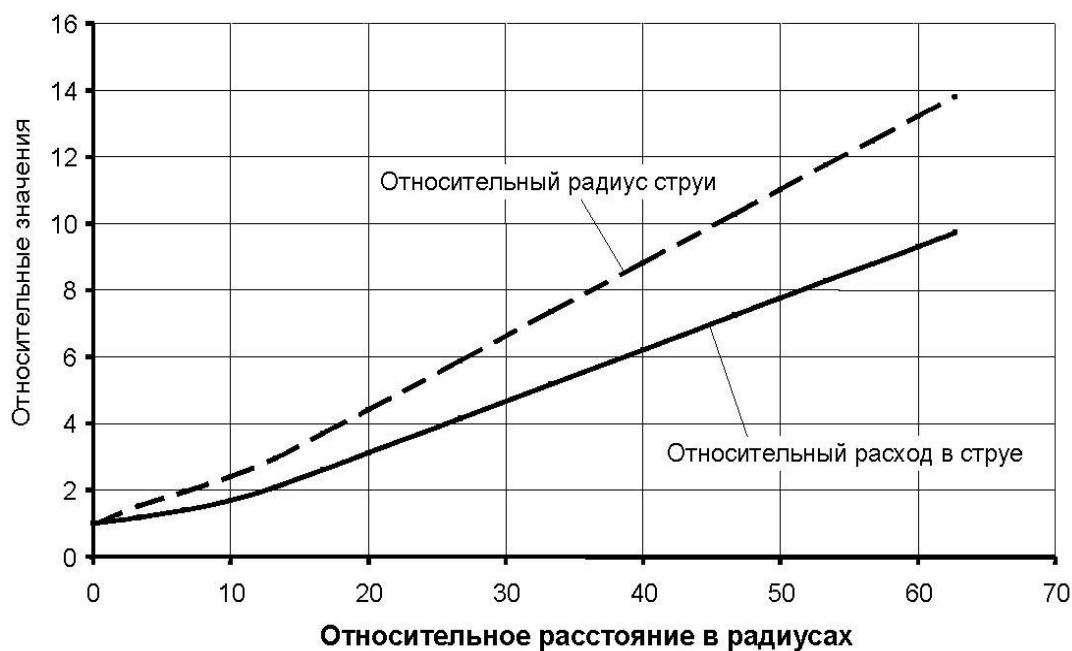


Рис. 3.8. Изменение радиуса и расхода в свободной струе

На рис. 3.9 приведено изменение средней температуры газов в струе при их вертикальном подъеме. Если бы к выходящим из трубы газам не подмешивался в процессе их движения воздух, то они охладились бы на участке подъема до $-1,88\text{ }^{\circ}\text{C}$. Однако за счет подмешивания окружающего воздуха, который имеет температуру $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ на всех высотах, снижение оказалось не таким сильным, всего лишь до $-0,95\text{ }^{\circ}\text{C}$.

На рис. 3.10 приведены результаты расчета для тех же условий, но при температуре газов, характерной для дымовых труб ТЭС.

Как видно из рис. 3.10, сила инерции в струе за счет начальной избыточной температуры газов растет. Сила Архимеда уравнивает силу инерции теперь уже на высоте 210 R (630 м). При подъеме дымовые газы охлаждаются ниже температуры окружающего воздуха, и сила Архимеда сначала начинает уменьшаться, а при $z = 190\text{ R}$ (570 м) меняет знак и становится направленной вниз.

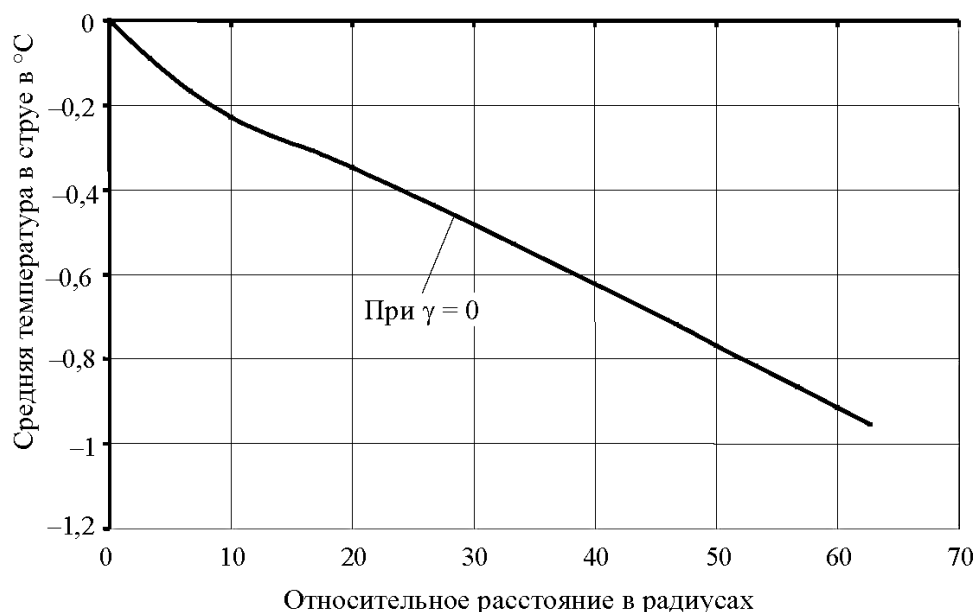


Рис. 3.9. Изменение средней температуры газов в струе за счет их адиабатического охлаждения

На рис. 3.11 приведено изменение средней температуры газов, которая за счет смешения с окружающим воздухом и за счет адиабатического охлаждения снижается и на высоте $130 R$ (390 м) становится равной температуре окружающей среды.

Над дымовой трубой может иметь место инверсионный градиент до $\gamma = -3 \text{ }^{\circ}\text{C}/100 \text{ м}$ (рост температуры воздуха с высотой). Как видно из рис. 3.12, подъем дымовых газов в этом случае заметно уменьшится и составит уже $124,7 R$ (374 м), или $59,3 \%$ от подъема при $\gamma = 0 \text{ }^{\circ}\text{C}/100 \text{ м}$.

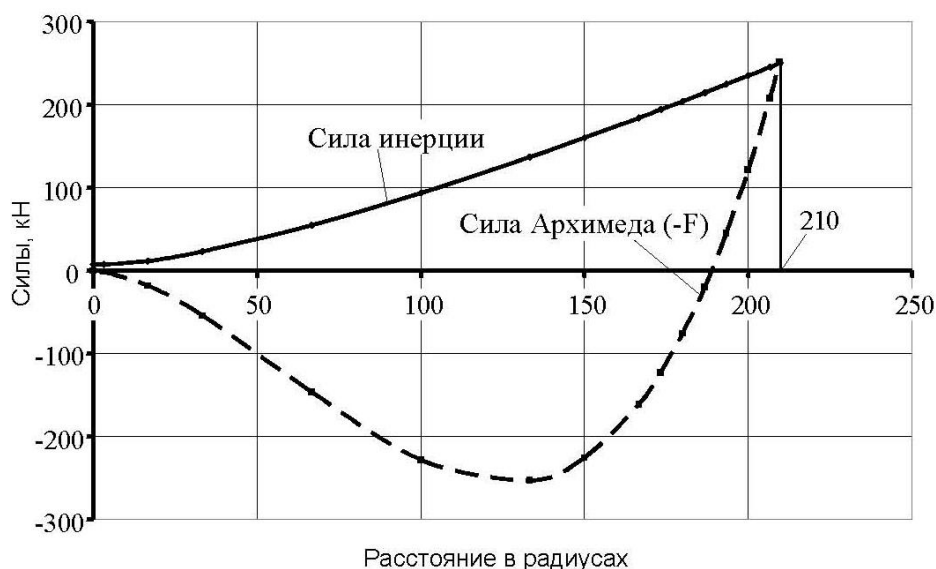


Рис. 3.10. Определение подъема дымовых газов при $\gamma = 0$

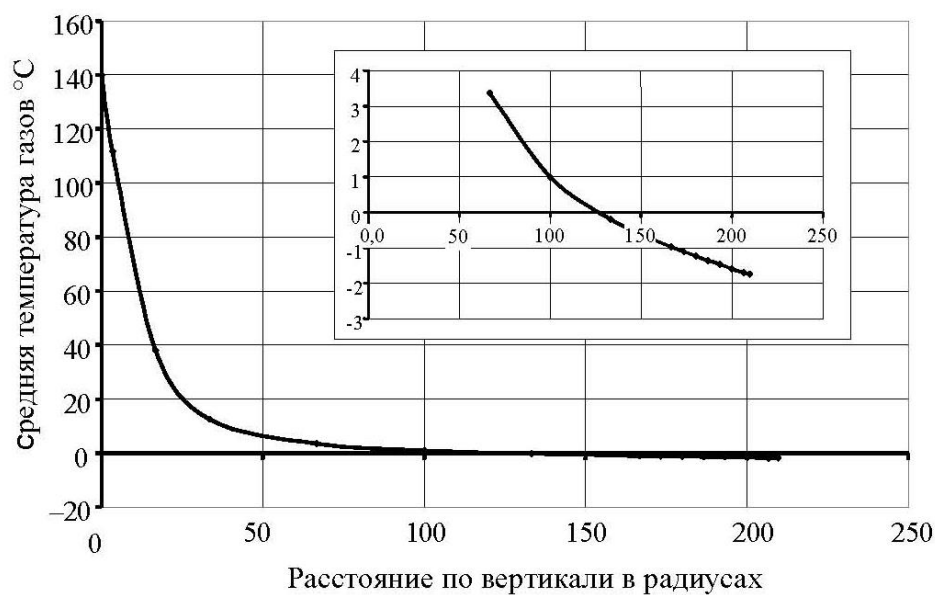


Рис. 3.11. Изменение средней температуры дымовых газов

На рис. 3.13 приведено изменение температуры воздуха и средней температуры газов в дымовом факеле с высотой. Из рисунка видно, что эти температуры выравниваются на высоте $75 R$ (225 м), а затем дымовые газы становятся более холодными, чем воздух. На рис. 3.12 этот уровень соответствует максимальной величине силы Архимеда, направленной вверх.

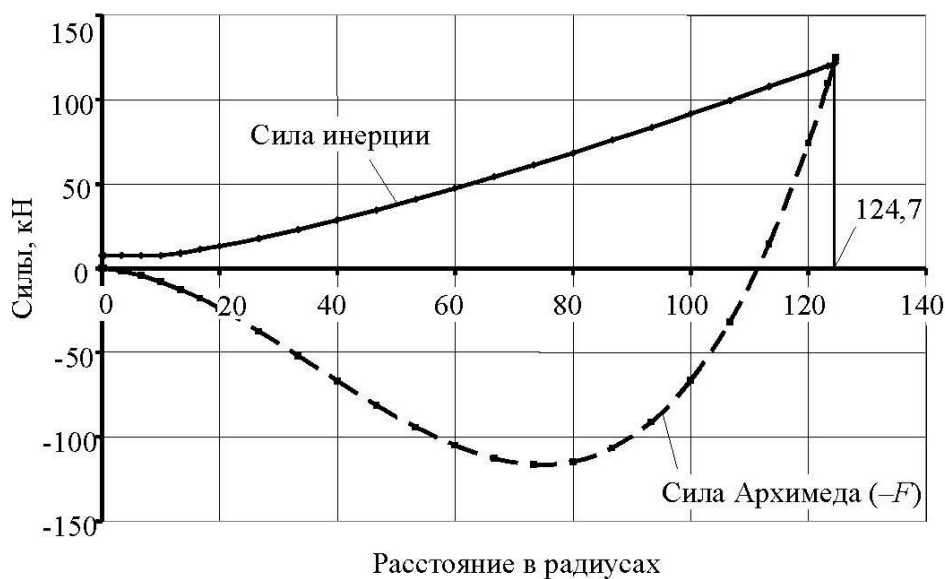


Рис. 3.12. Схема к определению подъема дымовых газов при $\gamma = -3 \text{ }^{\circ}\text{C}/100 \text{ м}$

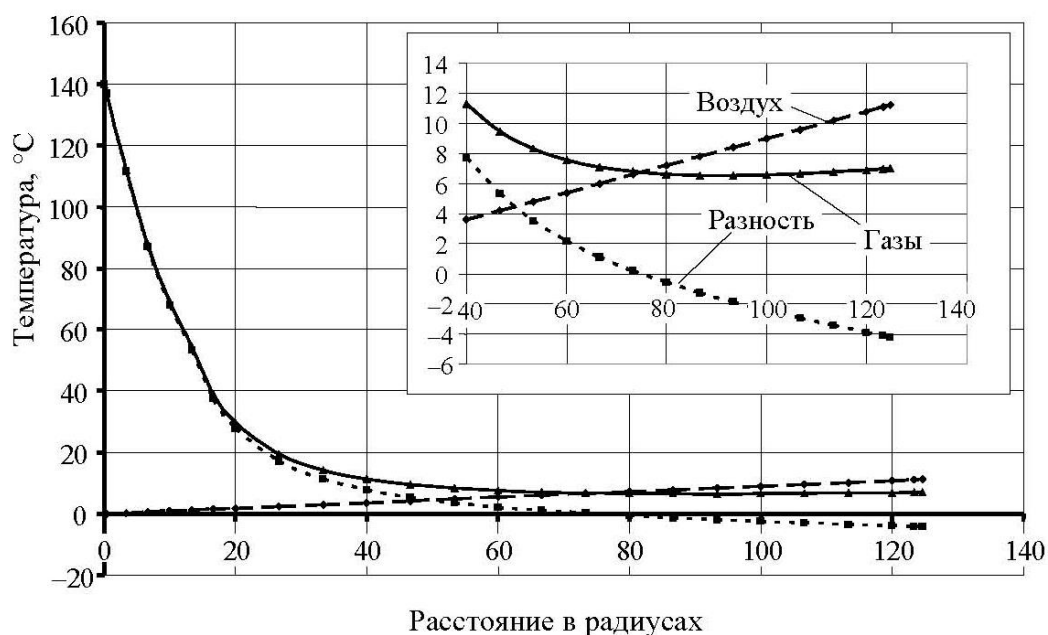


Рис. 3.13. Изменение температуры газов и воздуха при подъеме дымовых газов при $\gamma = -3 \text{ } ^\circ\text{C}/100 \text{ м}$

Разработанная схема позволяет также рассчитать минимально достаточное воздействие на дымовой факел, необходимое для того, чтобы пробить инверсионный слой с заданными характеристиками.

Так, например, в рассматриваемом примере приподнятая инверсия, расположенная непосредственно над устьем трубы мощностью (толщиной) 320 м и интенсивностью (градиентом) $\gamma = -3 \text{ } ^\circ\text{C}/100 \text{ м}$ и при градиенте температуры воздуха выше инверсионного слоя $\gamma = 2 \text{ } ^\circ\text{C}/100 \text{ м}$, задержит дымовые газы на высоте 430 м над трубой.

Однако, если увеличить температуру уходящих газов со 140 до $148 \text{ } ^\circ\text{C}$, то подъем становится бесконечным и все проблемы с загрязнением приземного слоя воздуха отпадают. Потери тепла с уходящими газами при этом увеличиваются на 6 %, а КПД котлов снижается примерно на 0,3 %. Как правило, это более приемлемо, чем снижение нагрузки путем остановки оборудования станции. Графики сил Архимеда и сил инерции для этого случая приведены на рис. 3.14.

В данном случае сила Архимеда не достигает величины силы инерции, хотя и достаточно близко приближается к ней при $z = 160 R$ (480 м). При большей высоте эта разница нарастает, что приводит к неограниченному подъему дымовых газов. Связано это с тем, что выше инверсионного слоя температура воздуха с увеличением высоты снижается и плавучесть дымового факела возрастает.

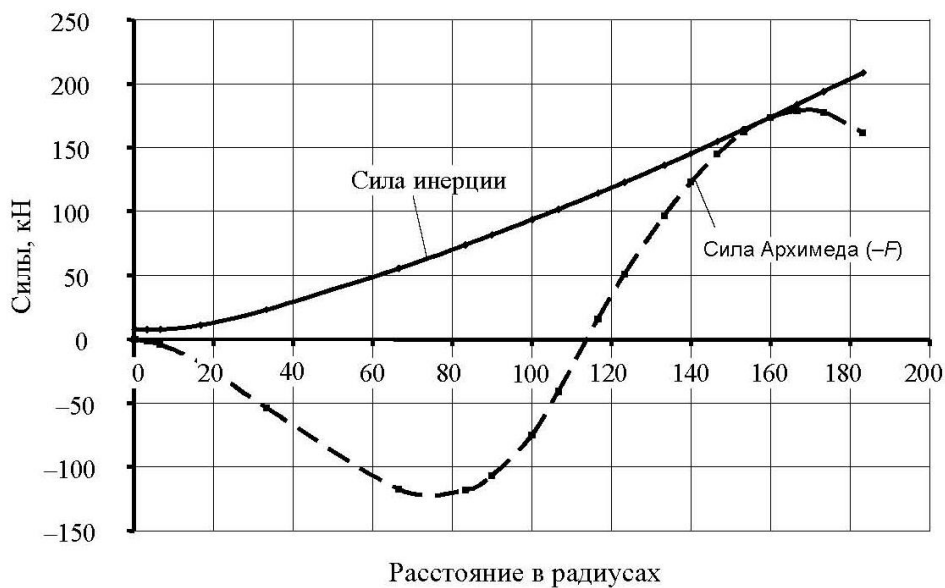


Рис. 3.14. Силы в дымовом факеле при преодолении инверсионного слоя

На рис. 3.15 приведены температуры дымовых газов, окружающего воздуха и их разность. Как видно из рисунка, в этом случае разность температур газов и воздуха дважды проходит через 0 при $z = 80 R$ (240 м) и $z = 170 R$ (510 м).

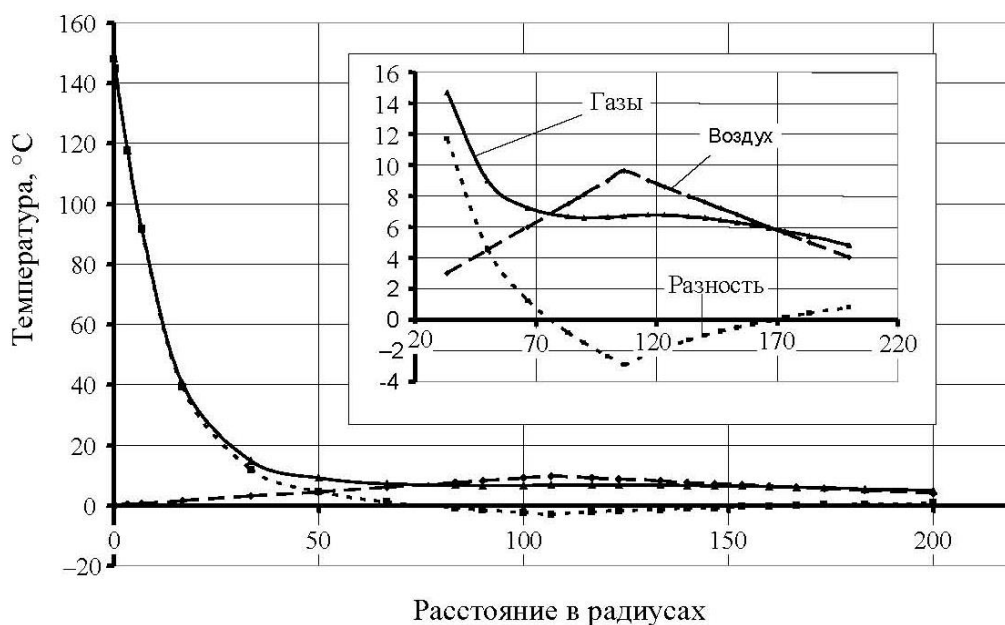


Рис. 3.15. Изменение температуры газов и воздуха при прохождении дымовых газов через инверсионный слой

3.4. Траектория дымового факела при малых скоростях ветра на начальном участке

В том случае, если известна закономерность изменения скорости струи от расстояния до источника, то путем наложения на эту зависимость сносящего потока можно получить ее траекторию:

$$dz = (w/u) dx. \quad (3.53)$$

Программа расчета траектории при малых скоростях ветра позволяет в том числе рассчитать и подъем дымового факела при штиле.

Сила инерции дымовых газов в сечении дымового факела рассчитывается относительно окружающего воздуха.

При расчете принято, что массовый расход в струе при его подъеме не должен уменьшаться. Количество движения рассчитывалось с учетом профиля скорости газов в струе по ее сечению. Скорость ветра в приведенных далее примерах принималась постоянной во всей зоне подъема факела, хотя разработанная по приведенной методике программа позволяет задаваться произвольным профилем скорости ветра.

Пример расчета траектории дымового факела при малых скоростях приведен на рис. 3.16. Расчет сделан применительно к максимальному режиму работы дымовой трубы № 1 НЧ ТЭЦ для условий:

- диаметр устья трубы – 9,6 м;
- скорость выхода дымовых газов – 20 м/с;
- температура уходящих дымовых газов – 150 °С;
- температура воздуха – 0 °С;
- температурный профиль – рост температуры воздуха на 3 °С/100 м.

Принято также, что данная расчетная схема пригодна только в том случае, если траектория дымового факела будет наклонена к горизонту на угол не менее 45°. Для расчета участков траекторий с углом наклона к горизонту менее 45° (пологих) разработана другая схема расчета.

При полном штиле для данных условий подъем дымовых газов составит $\Delta h_{45} = 454$ м. Как видно из рисунка, увеличение скорости ветра до 1 м/с почти не изменяет высоту его подъема, при которой наклон траектории в 45° будет достигнут на высоте $\Delta h_{45} = 447$ м при $x = 255,3$ м (кривая 5). Увеличение скорости ветра до 1,5 м приведет к уменьшению подъема до $\Delta h_{45} = 288$ м при $x = 210$ м (кривая 6), до 2 м/с – уменьшение до $\Delta h_{45} = 132$ м при $x = 94,1$ м (кривая 7), а до 3 м/с – до $\Delta h_{45} = 46$ м при $x = 32,1$ м (кривая 8).

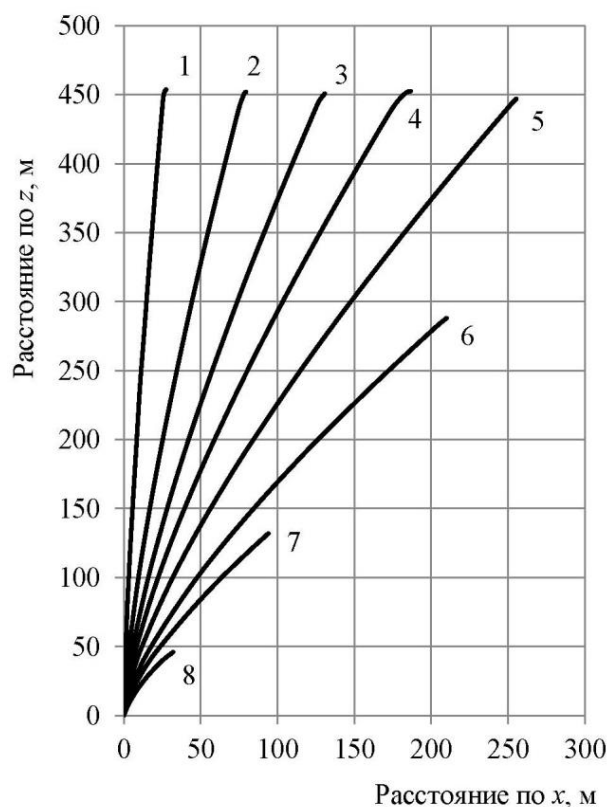


Рис. 3.16. Изменение траектории дымового факела при увеличении скорости ветра:

1 – $u = 0,1$ м/с; 2 – $u = 0,3$ м/с; 3 – $u = 0,5$ м/с; 4 – $u = 0,7$ м/с; 5 – $u = 1$ м/с;
6 – $u = 1,5$ м/с; 7 – $u = 2$ м/с; 8 – $u = 3$ м/с

Если труба будет работать на 50 % нагрузки летом при параметрах:

- диаметр устья трубы – 9,6 м;
- скорость выхода дымовых газов – 10 м/с;
- температура уходящих дымовых газов – 140 °С;
- температура воздуха – 20 °С;
- температурный профиль – рост температуры воздуха на 3 °С/100 м,

то подъем дымовых газов при отсутствии ветра уменьшится с 454 до 382 м.

Если труба будет работать на 100 % нагрузке при росте температуры воздуха на 2 °С/100 м, то подъем составит 506 м, а при этих же условиях при скорости ветра $u = 3$ м/с всего 46 м.

3.5. Траектория дымового факела при повышенных скоростях ветра

При повышенных скоростях ветра траектория имеет угол наклона средней линии к горизонту 45° и менее. Для этих условий рассматривается схема распространения, приведенная на рис. 3.17.

Гидродинамический участок подъема Δh_{Γ} определяется по схеме для вертикального подъема струи. Размеры поперечного сечения факела в конце участка гидродинамического подъема, а также средняя температура дымовых газов и окружающего воздуха берутся на основании расчета по вертикальной схеме при угле наклона 45° .

Далее рассматривается условие равновесия для элементарного диска, который в общем случае имеет эллиптическую форму с полуосями s (горизонтальная полуось) и b (вертикальная полуось) и толщиной Δx . При этом учитываются силы: Архимеда F_a , инерции $F_{\text{и}}$, давления F_d и трения $F_{\text{тр}}$.

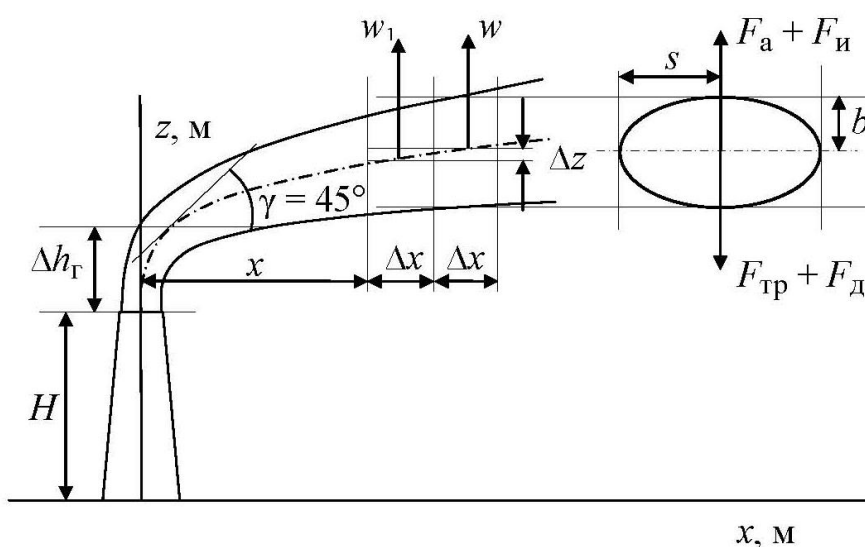


Рис. 3.17. Схема расчета траектории на основном участке

Условие равновесия запишется в виде:

$$F_a + F_{\text{и}} = F_{\text{тр}} + F_d. \quad (3.53)$$

Сила Архимеда может быть найдена из выражения:

$$F_a = g(\rho_{\text{в}} - \rho_{\Gamma})\pi s b \Delta x, \quad (3.54)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с^2 ; $\rho_{\text{в}}$ и ρ_{Γ} – плотность окружающего воздуха и дымовых газов соответственно, кг/м^3 ; π – число Пи; s и b – горизонтальная и вертикальная полуоси эллиптического сечения дымового факела, м; Δx – ширина элементарного участка траектории, м.

Найдем силу давления:

$$F_d = C_d \Delta \omega \rho_v (w^2/2), \quad (3.55)$$

где C_d – коэффициент давления; $\Delta \omega$ – площадь давления, м²; w – вертикальная составляющая скорости движения элементарного диска, м/с.

Учитывая, что площадь давления равна

$$\Delta \omega = 2s \Delta x, \quad (3.56)$$

получим

$$F_d = C_d \rho_v w^2 s \Delta x. \quad (3.57)$$

Силу трения найдем из выражения:

$$F_{тр} = C_{тр} \Delta \omega_{тр} \rho_v (w^2/2), \quad (3.58)$$

где $C_{тр}$ – коэффициент трения; $\Delta \omega$ – площадь трения, м².

Площадь трения можно найти по выражению:

$$\Delta \omega_{тр} = P \Delta x, \quad (3.59)$$

где P – периметр эллипса.

Периметр эллипса точно через элементарные функции не выражается, однако можно предложить приближенное уравнение, дающее ошибку менее 2 % во всем диапазоне интересующих нас соотношений s/b :

$$P = 2\pi s \left[0,637 + 0,363 \cos^{1,45} \left(\arcsin \left(\frac{\sqrt{s^2 - b^2}}{s} \right) \right) \right]. \quad (3.60)$$

Сила инерции

$$F_{и} = ma, \quad (3.61)$$

где m – масса элементарного участка дымового факела, кг; a – ускорение массы элементарного участка, м/с².

Масса элементарного участка

$$m = V \rho_{г}, \quad (3.62)$$

где V – объем элементарного участка, м³.

Определим объем элементарного участка:

$$V = \pi s b \Delta x. \quad (3.63)$$

Рассчитаем вертикальное ускорение между двумя соседними участками:

$$a = \frac{w_1 - w}{\tau}. \quad (3.64)$$

Здесь w_1 – вертикальная составляющая скорости движения газов на предыдущем элементарном участке, м/с; w – текущая вертикальная составляющая скорости движения газов, м/с; τ – время, за которое дымовые газы переносятся ветром на расстояние Δx .

В первом расчетном сечении w_1 принимается равной вертикальной составляющей скорости газов из вертикальной схемы распространения струи при угле наклона траектории к горизонту $\gamma = 45^\circ$. При переходе к последующей паре участков за w_1 предыдущего участка принимается w для последующего из первой пары участков.

Подставляя (3.62)–(3.64) в (3.61), получим

$$F_{\text{и}} = \pi s b \rho_{\text{г}} u (w_1 - w). \quad (3.65)$$

Подставляя значения сил из выражений (3.55), (3.57), (3.58) и (3.65) в (3.53), получим квадратное уравнение относительно текущей вертикальной составляющей скорости движения газов (скорости всплытия) w , решение которого запишется в виде:

$$w = \frac{-D_2 + \sqrt{D_2^2 + 4D_1D_3}}{2D_1}. \quad (3.66)$$

В выражении (3.66):

$$D_1 = C_{\text{д}} s + C_{\text{тр}} \frac{P}{2}; \quad (3.67)$$

$$D_2 = \frac{\pi s b T_{\text{в}} u}{\Delta x T_{\text{г}}}; \quad (3.68)$$

$$D_3 = \pi s b g \left[\left(1 - \frac{T_{\text{в}}}{T_{\text{г}}} \right) + \frac{T_{\text{в}} u w_1}{g \Delta x T_{\text{г}}} \right]. \quad (3.69)$$

В общем случае коэффициент давления может быть принят равным

$$C_{\text{д}} = 0,7 + 0,6 \left[\left(\frac{s}{b} \right)^2 - 1 \right]. \quad (3.70)$$

Время τ , за которое дымовые газы будут переноситься ветром на расстояние Δx , находим по формуле:

$$\tau = \Delta x / u. \quad (3.71)$$

Зная скорость w на этом участке, найдем подъем дымового факела на текущем элементарном участке:

$$\Delta z = \tau w. \quad (3.72)$$

При переходе к следующему расчетному участку определяем новые размеры полуосей эллипса:

$$s_i = s + \varepsilon_y \Delta x; \quad (3.73)$$

$$b_i = b + \varepsilon_z \Delta x, \quad (3.74)$$

где ε_y и ε_z – интенсивность турбулентности атмосферы в горизонтальной и вертикальной плоскостях соответственно.

На основании анализа данных натурных исследований можно принять

$$\varepsilon_y = 0,44 \sin^2 \left[\frac{\pi (0,1 - Б)}{1,2} \right] + 0,16; \quad (3.75)$$

$$\varepsilon_z = 0,54 \sin^3 \left[\frac{\pi (0,2 - Б)}{1,4} \right] + 0,06. \quad (3.76)$$

В формулах (3.75) и (3.76) через $Б$ обозначен аналог числа Будыко:

$$Б = \frac{\Delta t}{u^2}, \quad (3.77)$$

где Δt – разность температуры на границах 100-метрового слоя воздуха;
 u – средняя скорость ветра в этом слое, м/с.

Новый текущий объем элементарного диска составит:

$$V_i = \pi s_i b_i \Delta x. \quad (3.78)$$

Затем находим новое значение средней абсолютной температуры газов:

$$T_i = \frac{V_i T_B}{V_i - V_1 \left(1 - \frac{T_B}{T_1}\right)} - \gamma_a \Delta z \left(\frac{V_1}{V_i}\right). \quad (3.79)$$

Здесь V_1 – объем предыдущего элементарного диска, м^3 ; T_1 – средняя абсолютная температура газов в предыдущем элементарном сечении, К; T_B – абсолютная температура окружающего воздуха, К; γ_a – адиабатический температурный градиент, $\gamma_a = 1 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ м}$.

Формула (3.79) учитывает также охлаждение перемещающегося вверх объема дымовых газов за счет его расширения при попадании в область понижающегося атмосферного давления.

Таким образом, переходя от участка к участку и принимая конечные параметры предыдущего участка за начальные последующего, находятся последовательные приращения Δz . Суммируя соответствующие приращения Δx и Δz , получим траекторию средней линии дымового факела. Прибавляя к ней верхнюю вертикальную полуось эллипса, получим траекторию верхней границы дымового факела. Отнимая от нее нижнюю вертикальную полуось эллипса, получаем нижнюю границу траектории дымового факела.

Подъем дымового факела определяем как положение средней линии траектории над точкой касания ее земной поверхности.

Если в пределах рассматриваемого участка $x = 3 \text{ км}$ нижняя граница земли не достигнет, то за подъем принимаем положение средней линии траектории при $x = 3 \text{ км}$.

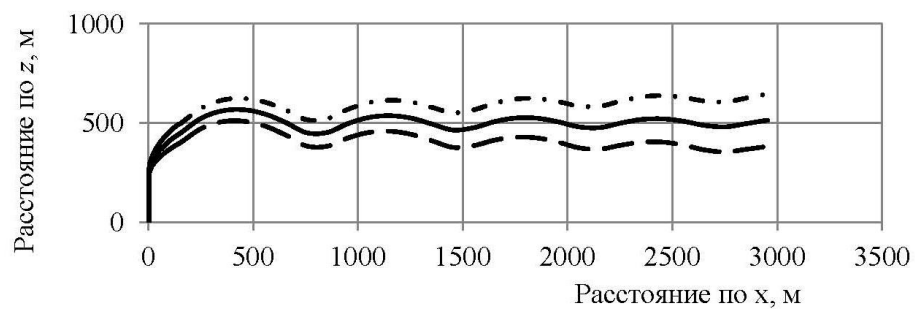
Если траектория имеет волнообразный характер, то за подъем дымового факела принимаем среднее значение z первой волны.

По приведенной методике создана программа расчета пологого участка траектории. Далее приведены примеры расчета траекторий.

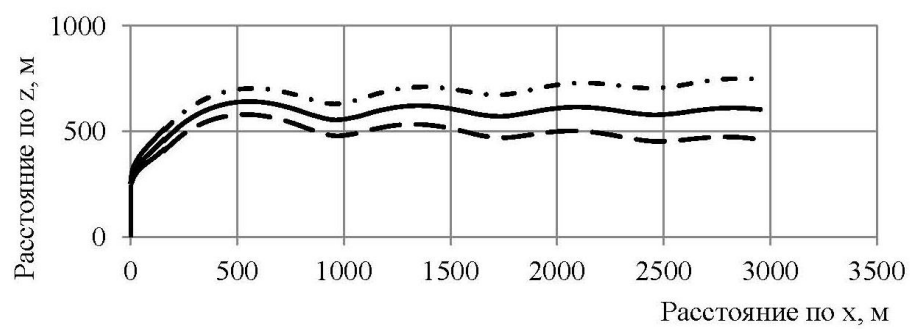
Расчеты сделаны для следующих условий:

- диаметр устья трубы – 9,6 м;
- скорость выхода дымовых газов – 20 м/с;
- температура уходящих дымовых газов – 150 $^\circ\text{C}$;
- температура воздуха – 0 $^\circ\text{C}$;
- скорость ветра $u = 3 \text{ м/с}$;

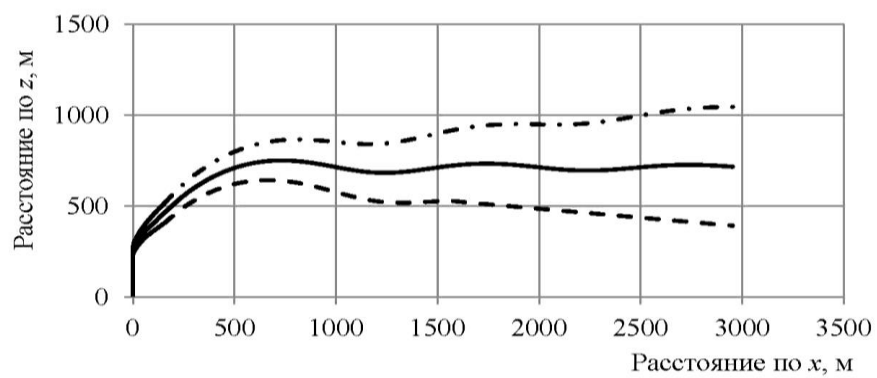
– температурный профиль – рассмотрены различные варианты изменения температуры воздуха с высотой (рис. 3.18).



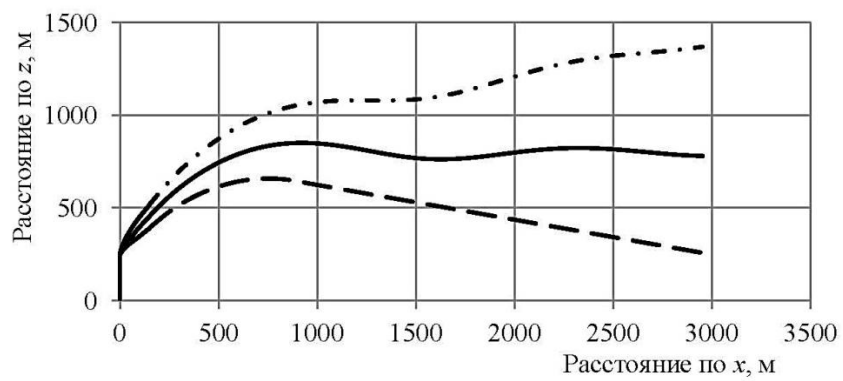
a



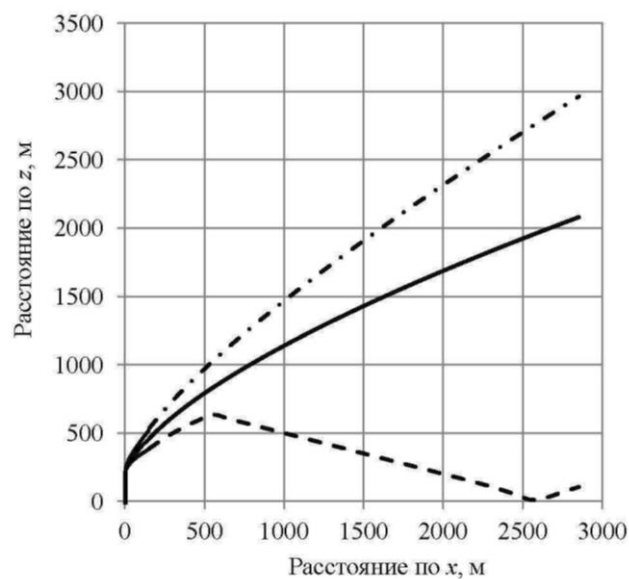
б



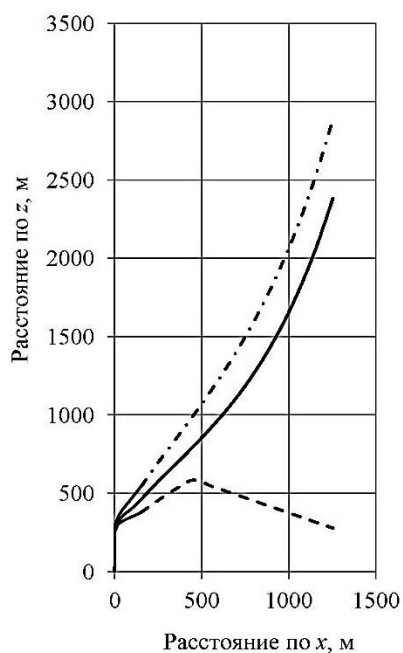
в



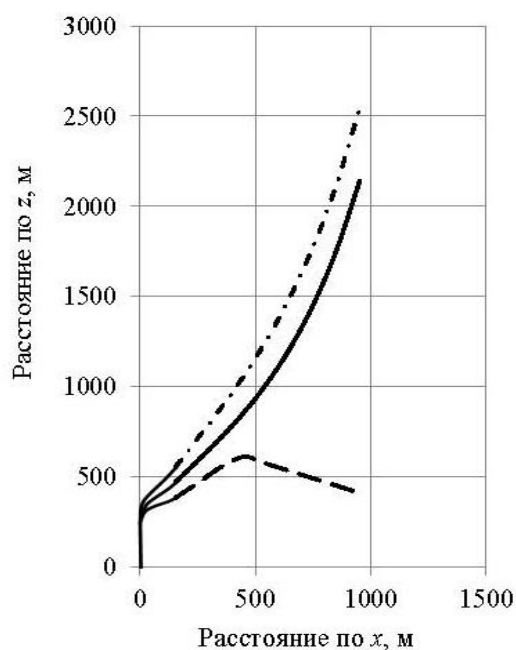
г



д



е



жс

Рис. 3.18. Траектории распространения дымового факела: *а* – при $\gamma = 2$ К/100 м ;
б – при $\gamma = 1$ К/100 м ; *в* – при $\gamma = 0$ К/100 м ; *г* – при $\gamma = -0,5$ К/100 м ;
д – при $\gamma = -1,0$ К/100 м ; *е* – при $\gamma = -1,5$ К/100 м ; *жс* – при $\gamma = -2,0$ К/100 м

При росте температуры на 2 К/100 м (рис. 3.18, *а*) траектория имеет волновой характер, а ее высота подъема ограничена и составляет примерно 250 м над устьем дымовой трубы.

Из рис. 3.18, *б* видно, что при уменьшении температурного градиента с 2 до 1 К/100 м при той же скорости ветра подъем дымового факела увеличивается примерно на 100 м. Форма факела остается

волновой, но длина волны увеличивается. Увеличивается и угол раскрытия дымового факела в вертикальной плоскости.

На рис. 3.18, *в* приведена траектория для изотермического профиля температуры. Таким образом, при дальнейшем уменьшении температурного градиента до 0° K/100 м подъем дымового факела, хотя и увеличивается до 450 м над устьем дымовой трубы, но все же остается ограниченным. Угол раскрытия его границ еще больше увеличивается.

Из рис. 3.18, *а–в* следует, что подъем дымового факела будет иметь ограниченную величину не только для инверсионных, но и для всех доадиабатических градиентов температуры. Величина этого подъема зависит не только от скорости ветра, но и от величины этого градиента.

Для случая понижения с высотой температуры воздуха, т. е. при дальнейшем изменении характера температурного профиля до $\gamma = -0,5 \text{ K/100 м}$ (рис. 3.18, *г*), подъем факела остается ограниченным, но увеличивается до 550 м. Изменяется характер его нижней границы. Как только она отходит на достаточно большое расстояние от центра факела, ее траектория определяется уже лишь турбулентностью атмосферы.

Из рис. 3.18, *д* видно, что как только температурный градиент становится равным -1 K/100 м , т. е. равным адиабатическому, траектория распространения дымового факела резко изменяет свой характер. Подъем дымового факела становится неограниченным, раскрытие дымового факела еще больше увеличивается и нижняя граница дымового факела достигает земли на довольно близком расстоянии от дымовой трубы.

На рис. 3.18, *е* и *ж* сплошной линией показана траектория центра масс дымового факела. Из этого следует, что хотя нижняя граница факела достаточно быстро достигает земли, но концентрации вредных примесей здесь будут значительно меньше, чем на уровне выше траектории центра масс.

На начальном участке дымового факела нижняя граница связана с перемещением средней линии дымового факела за счет поля вертикальных скоростей, создающих разрежение в нижней части факела, которое и приподнимает нижнюю границу. Со снижением скорости всплытия дымовых газов и удаления нижней границы от центра факела этот эффект уменьшается и в основном прекращается при прекращении вращения парного вихря, который имеет место в начальном участке траектории и образуется при взаимодействии выходящих из дымовой трубы газов и сносящего потока воздуха. Дальнейшее перемещение нижней границы обуславливается за счет вертикальных атмосферных пульсаций, которые можно оценить величиной интенсивности турбулентности атмосферы ε_z .

Из рис. 3.18, *е* видно, что при дальнейшем увеличении адиабатического температурного градиента изменяется знак производной скорости его подъема.

Скорость подъема дымового факела будет увеличиваться из-за нарастания разности температуры между окружающим воздухом и средней температурой в дымовом факеле. Нижняя граница будет касаться земли еще ближе к дымовой трубе.

Из рис. 3.18, *ж* видно, что подъем дымового факела будет нарастать еще быстрее, чем при $\gamma = -1,5 \text{ K}/100 \text{ м}$ (см. рис. 3.18, *е*). Нижняя граница будет достигать земли примерно на том же расстоянии.

Таким образом, из рассмотренного примера видим, что температурный градиент в атмосфере влияет на траекторию дымового факела более сильно при сверхадиабатических градиентах.

В натуральных условиях в связи с быстрым раскрытием границ их видимость иногда пропадает на расстоянии уже нескольких сот метров от дымовой трубы. О касании дымового факела земли в этом случае можно судить только по данным анализов воздуха на содержание примесей, характерных для данного выброса. При этом, однако, возникают достаточно большие проблемы идентификации выбросов рассматриваемого источника от других, если они также выбрасывают данный вид примеси.

3.6. Траектория дымового факела при высоких скоростях ветра

В том случае, если скорость ветра заметно превышает скорость выхода дымовых газов из устья трубы, на начальном участке траектории формируется флагообразный дымовой факел (см. рис. 3.1, *в*). Выходная часть дымовой трубы находится при этом в условиях окутывания собственными дымовыми газами, или в условиях самоокутывания.

Теоретические основы возникновения явления самоокутывания оголовка дымовой трубы приведены в [36]. Показано, что такое явление может наблюдаться при сочетании низких скоростей выхода дымовых газов с высокими скоростями ветра. И чем меньше скорость выхода газов, тем более длительное время такие условия могут существовать.

Условие качественного изменения течения при переходе от расчетной картины (наличие бифуркации) к течению с самоокутыванием в этой работе определено как $I < 2,4$, где I – гидродинамический параметр. В натуральных условиях получилось немного меньше, в среднем $I < 2,2$.

При этом на выходе из трубы парный вихрь не образуется, а так называемая бифуркация дымового факела отсутствует (рис. 3.19, *а*).

Устье дымовой трубы при этом закрыто дымом. На рис. 3.19, *б* устье трубы хорошо просматривается, самоокутывания нет, а в дымовом факеле выделяются две крайние и средняя зоны, что свидетельствует о наличии парного вихря. Горизонтальный размер такого факела больше, чем при наличии самоокутывания. Другими словами, начальное поперечное сечение дымового факела имеет форму, вытянутую по горизонтали, а при наличии самоокутывания – по вертикали.



а



б

Рис. 3.19. Вид на дымовой факел снизу при наличии (*а*) и отсутствии (*б*) самоокутывания

Создаваемая при самоокутывании с подветренной стороны зона повышенной турбулентности имеет некоторое протяжение, которое можно наблюдать по вертикальным перемещениям клубов дыма вниз. При скорости выхода дымовых газов $w = 4$ м/с и скорости ветра $u = 8$ м/с длина этой зоны составляет примерно 80 м. Примем, что ширина этой зоны (a_c) линейно убывает (рис. 3.20).

В сечении 1–1 со стороны дымовой трубы (левая сторона сечения) проходит такой же объемный расход дымовых газов, как и тот, который выходит из устья трубы. Примем, что поперечное сечение дымового факела с левой границы сечения 1–1 имеет форму эллипса. Площадь поперечного сечения этого эллипса будет зависеть от площади устья дымовой трубы и отношения скоростей ветра и выхода газов из трубы.

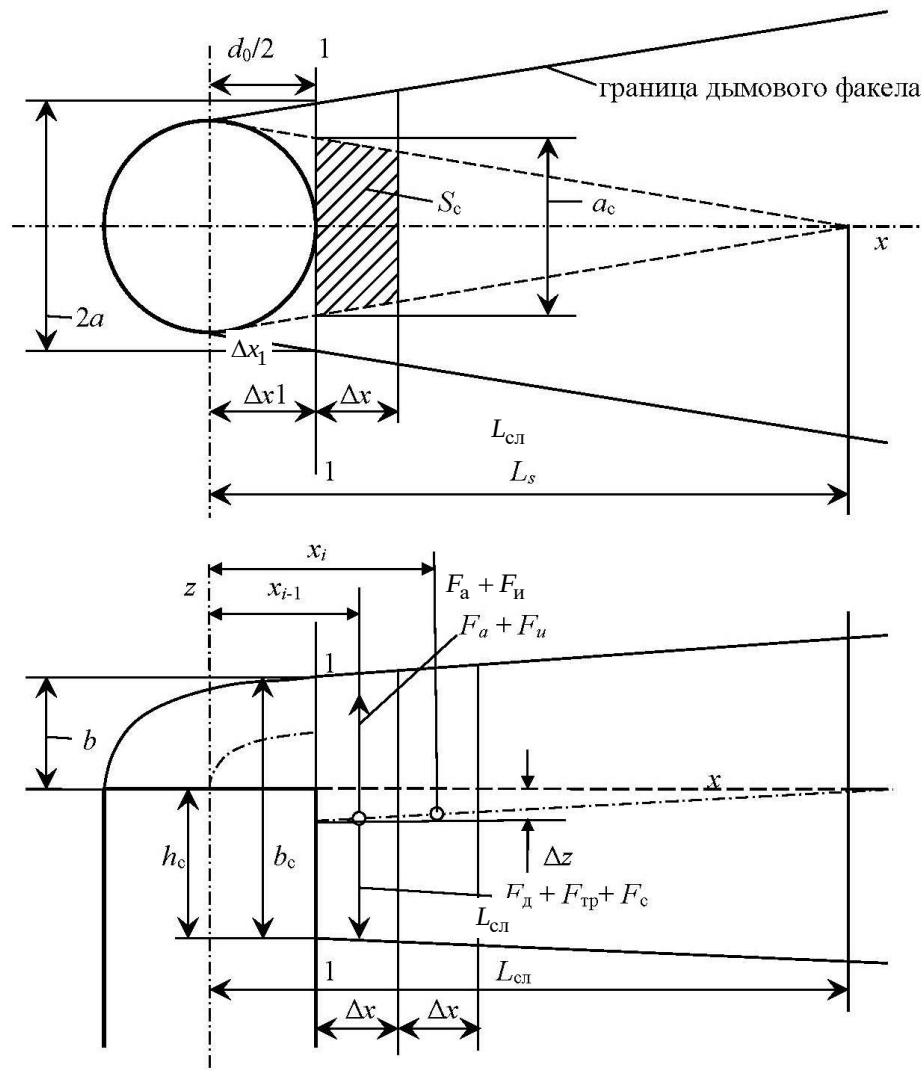


Рис. 3.20. Формирование начального участка дымового факела

Так, например, если скорость ветра в два раза больше, чем скорость выхода газов, то площадь поперечного сечения с левой стороны сечения 1–1 будет в два раза меньше площади поперечного сечения устья дымовой трубы. Горизонтальную полуось эллипса в первом приближении можно принять равной радиусу устья дымовой трубы, а вертикальную полуось найдем, зная площадь поперечного сечения и горизонтальную полуось.

Размер h_c , на который скачком опустится нижняя граница дымового факела справа от сечения 1–1 и который зависит от гидродинамического параметра и скорости ветра, находится из натурных данных. Сложив вертикальную ось эллипса с левой стороны сечения 1–1 с размером h_c , получаем вертикальную ось эллипса поперечного сечения дымового факела с правой стороны сечения 1–1. Горизонтальную ось этого сечения можно принять равной диаметру устья дымовой трубы.

Таким образом получается эллипс с большей осью, ориентированной в вертикальной плоскости, который будет иметь более обтекаемую форму при всплытии дымового факела. Серединой вертикального размера дымового факела – его осью – будем считать середину вертикальной стороны эллипса, которая оказывается ниже устья дымовой трубы на величину Δz .

Отношение площадей поперечных сечений с правой и левой сторон сечения 1–1 показывает, во сколько раз скачкообразно увеличился объемный расход в дымовом факеле за счет присоса атмосферного воздуха при имеющем место интенсивном вихреобразовании. Учитывая температуры воздуха и газов и их плотности, найдем изменение массового расхода. Так, например, расчеты показывают, что при скорости выхода дымовых газов $w = 4$ м/с и скорости ветра $u = 8$ м/с массовый расход увеличился более чем в 10 раз.

Используя закон сохранения количества движения, определим, на сколько уменьшится вертикальная составляющая скорости дымовых газов при увеличении их массы. Так, например, при скорости газов в устье трубы $w = 4$ м/с, с правой стороны сечения 1–1 эта скорость падает до 0,3–0,4 м/с.

Зная объемные расходы и температуры дымовых газов с левой и с правой сторон сечения 1–1, температуры дымовых газов и окружающего воздуха и учитывая изменение температуры газоздушнoй смеси при ее адиабатическом вертикальном перемещении, найдем температуру дымовых газов в дымовом факеле справа от сечения 1–1:

$$T_2 = \frac{V_2 \cdot T_{\text{окр}}}{V_2 - V_1 \cdot \left(1 - \frac{T_{\text{окр}}}{T_1}\right)} - 0,01 \cdot \left(\frac{V_1}{V_2}\right) \cdot \Delta z, \quad (3.80)$$

где V_1 – объемный расход дымовых газов слева от сечения 1–1; V_2 – объемный расход дымовых газов справа от сечения 1–1; $T_{\text{окр}}$ – температура окружающего воздуха, К; T_1 – температура газов на выходе из дымовой трубы, К; Δz – изменение положения оси дымового факела на расчетном участке.

Как показывают расчеты, средняя температура в объеме дымовых газов снизится при этом, например, с 95 до 8–9°C.

Далее рассматривается условие равновесия элементарного участка дымового факела при приращении Δx , достаточно малом, чтобы считать все характеристики этого участка постоянными.

Чтобы обеспечить условие равновесия элементарного участка, нужно обеспечить равенство сил (рис. 3.29):

$$F_a + F_{\text{и}} = F_{\text{д}} + F_{\text{тр}} + F_{\text{с}}, \quad (3.81)$$

где F_a , $F_{\text{и}}$, $F_{\text{д}}$, $F_{\text{тр}}$ и $F_{\text{с}}$ – соответственно силы Архимеда, инерции, давления, трения и самоокутывания, Н.

Для участка струи сила Архимеда

$$F_a = 9,81\pi g_p w_p (r_w - r_g) dx, \quad (3.82)$$

где r_w и r_g – плотности окружающего воздуха и газовой смеси в пределах текущего элементарного объема, кг/м³; $\pi = 3,14$; g_p и w_p – горизонтальная и вертикальная полуоси эллипса, м; dx – размер элементарного участка по оси x , м.

Сила инерции

$$F_{\text{и}} = \pi g_p w_p r_g (w - w_{i-1}) u_c, \quad (3.83)$$

где w – скорость вертикального перемещения расчетного участка, м/с; w_{i-1} – скорость всплытия участка, предшествующего расчетному, м/с; u_c – скорость ветра на оси расчетного участка, м/с.

Сила давления

$$F_{\text{д}} = c_{\text{д}} r_w w^2 g_p dx, \quad (3.84)$$

где $c_{\text{д}}$ – коэффициент давления для расчетного участка.

Сила трения

$$F_{\text{т}} = 0,5 c_{\text{т}} r_w w^2 P dx, \quad (3.85)$$

где $c_{\text{т}}$ – коэффициент трения на расчетном участке; P – периметр расчетного участка, м.

Сила самоокутывания

$$F_{\text{с}} = c_{\text{с}} r_w u_c^2 d_0 dx \left(\frac{L_{\text{сл}} - x_{i-1}}{2L_{\text{сл}}} \right), \quad (3.86)$$

где $c_{\text{с}}$ – коэффициент снижения давления на подветренной стороне; d_0 – наружный диаметр дымовой трубы в устье, м; $L_{\text{сл}}$ – длина

турбулентного следа, м; x_{i-1} – расстояние от оси трубы до предыдущего расчетного участка.

Подставляя выражения (3.82)–(3.86) в (3.81) и решая его относительно w , находим величину скорости всплытия данного элементарного участка. Зная скорость ветра и размер Δx , находим время прохождения дымовыми газами участка dt . Зная скорость вертикального перемещения участка и время этого перемещения, найдем величину вертикального перемещения участка Δz .

После расчета текущего элементарного участка переходим к расчету следующего с учетом того, что его полуоси увеличиваются в зависимости от интенсивности турбулентности атмосферы в горизонтальной и вертикальной плоскостях на данном уровне. По размерам полуосей определяется величина периметра и поперечных сечений участка на входе и на выходе. Зная скорость ветра на данном уровне, находим объемные расходы в начале и в конце участка. Зная объемные расходы, по формуле (3.80) определяем среднюю температуру в следующем расчетном участке. По этой температуре находится плотность и решается система уравнений для нового участка и так далее. В результате получается траектория средней линии и границ дымового факела.

На рис. 3.21 приведен пример изменения действующих сил в дымовом факеле по мере его переноса ветром. Все действующие в факеле силы отнесены к размеру участка факела длиной 1 м и имеют размерность Н.

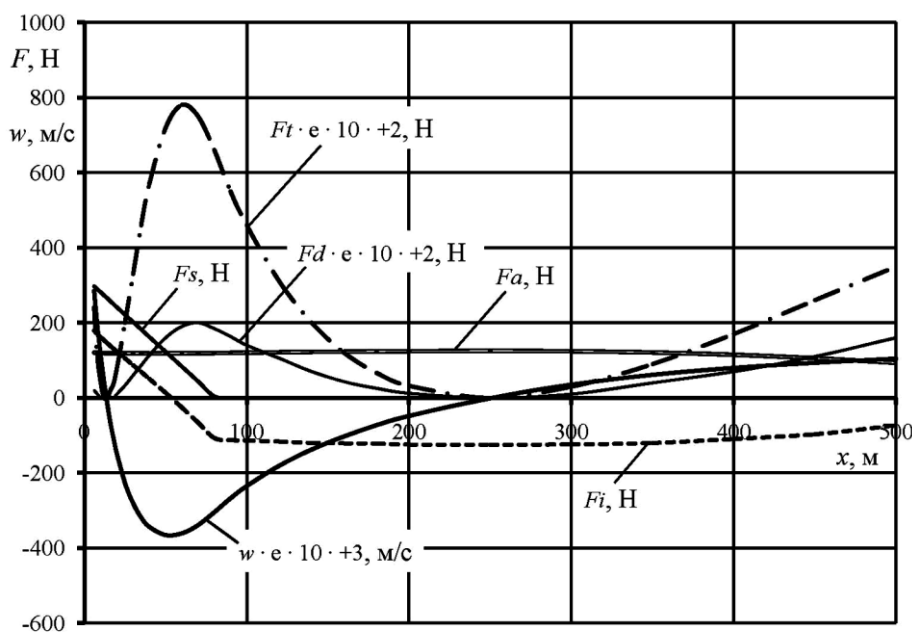


Рис. 3.21. Изменение действующих сил и скорости всплытия по длине факела с учетом самоокутывания

На рисунке приведена также текущая скорость вертикального перемещения факела w (скорость всплытия). Для возможности наглядного сравнения различных величин на одном графике для них введены масштабирующие коэффициенты. Так, например, для скорости вертикального перемещения значение этой скорости нужно поделить на 10^3 . Если по графику видим значение скорости минус 200, это значит, что на данном расстоянии элементарный участок факела опускается со скоростью 0,2 м/с.

В связи с малыми скоростями вертикальных перемещений малы и силы лобового сопротивления и трения, значения которых нужно делить на 100.

Из рисунка видно, что на начальном участке основными действующими силами являются сила Архимеда F_a , которая согласно закону сохранения количества тепла в границах дымового факела меняется мало, силы самоокутывания F_c и инерции $F_{ин}$. Сила F_c действует только в пределах длины турбулентного следа и затем становится равной нулю. Сила $F_{ин}$ зависит от ускорения расчетного участка в вертикальной плоскости и за пределами турбулентного следа меняется мало. Из рисунка можно видеть, что при скорости всплытия $w = 0$ силы давления F_d и трения F_T также равны нулю.

Из рис. 3.21 также видно, что на начальном участке под действием силы самоокутывания скорость всплытия факела начинает довольно быстро падать и уже на расстоянии 20 м становится отрицательной, т. е. факел начинает опускаться. При увеличении скорости всплытия увеличиваются также силы трения и давления на факел со стороны окружающего воздуха.

После того как действие силы самоокутывания прекращается, за счет силы Архимеда уменьшается и скорость опускания дымового факела, которая при $x = 250$ м становится нулевой. При этом сила Архимеда равна силе инерции. Однако производная от скорости всплытия факела при этом не нулевая, а значит и сила инерции продолжает действовать и вместе с силой Архимеда приводит к положительным значениям скорости всплытия. В данном примере мы ограничились участком 500 м.

На рис. 3.22 приведены некоторые другие характеристики дымового шлейфа. Так, например, приведено изменение средней температуры в поперечном сечении дымового факела t_g . Ее значения по шкале ординат нужно делить на 100. Другими словами, за счет скачкообразного увеличения объемного расхода температура в факеле падает с 95 до 9 °С.

На расстоянии 100 м эта температура снижается до 1,5 °С и в дальнейшем меняется мало. Однако при некоторых других условиях эта температура, за счет сил инерции и адиабатического изменения его температуры с учетом изменения атмосферного давления по высоте, может оказаться меньше температуры окружающего воздуха и дымовой факел начнет опять опускаться.

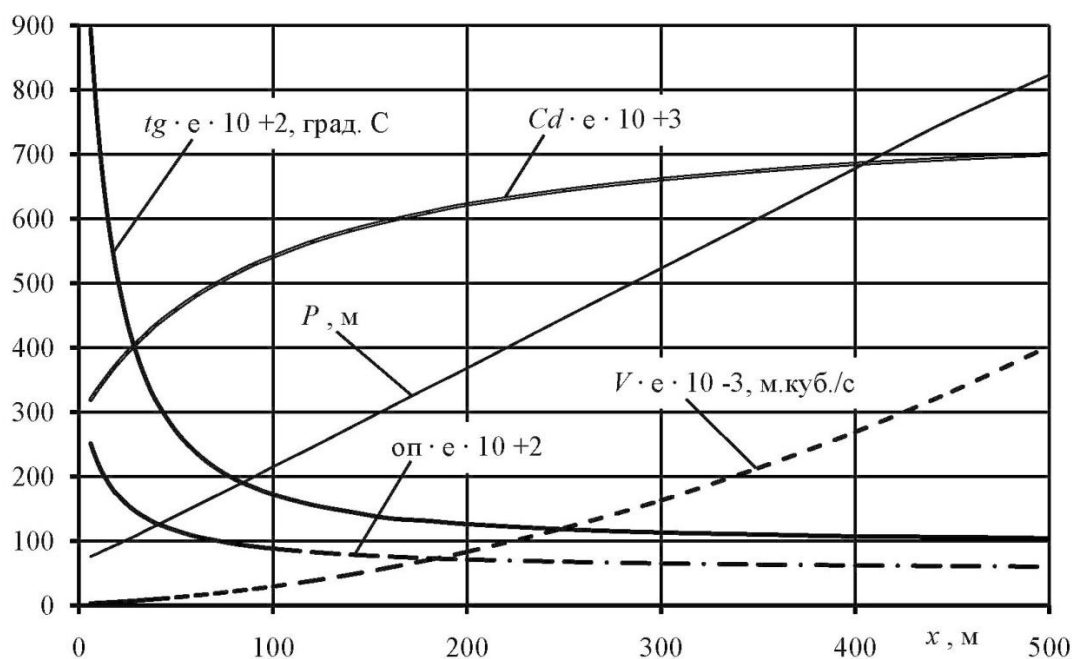


Рис. 3.22. Изменение характеристик дымового факела по его длине с учетом самоокутывания

На рисунке приведено также отношение вертикальной оси поперечного сечения эллипса к горизонтальной (оп), значение которого нужно делить на 100. Так, например, в начале траектории вертикальная ось больше горизонтальной и факел имеет обтекаемую форму при вертикальном перемещении (оп приблизительно равно 2). В дальнейшем под действием того, что интенсивность турбулентности в горизонтальной плоскости больше, чем в вертикальной, это отношение становится меньше единицы. В зависимости от этого меняется и коэффициент давления c_d , значение которого на графике нужно делить на 10^3 и который увеличивается от 0,3 до 0,7. На рис. 3.22 приведено также изменение периметра поперечного сечения дымового факела P и объемного расхода V , значение которого с оси ординат нужно умножать на 10^3 .

На рис. 3.23 приведены средняя геометрическая линия траектории факела и его границы. Сравнивая результат расчета с натурным снимком, и учитывая, что на фотографии участки с низкими концентрациями

дымовых газов становятся невидимыми, можно отметить, что натурная траектория находится примерно симметрично от его средней линии и в пределах рассчитанных границ.

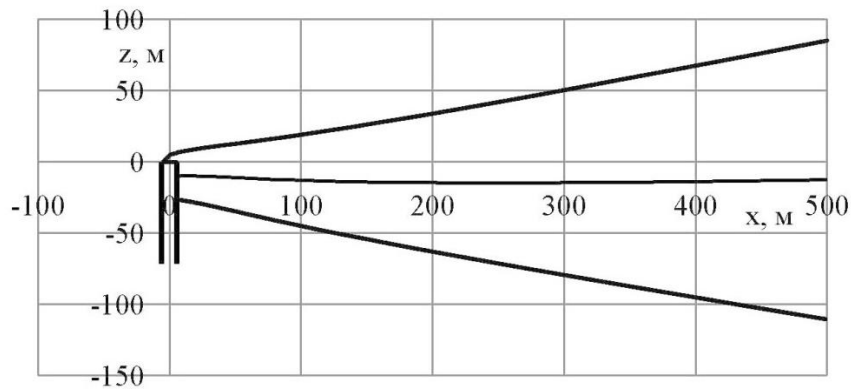


Рис. 3.23. Расчетная траектория дымового факела с учетом самоокутывания

Наибольший интерес представляет влияние сил самоокутывания на траекторию дымового факела. Результаты расчета траектории для тех же условий, но без учета силы самоокутывания приведены на рис. 3.24–3.26.

Сравнивая рис. 3.21 и 3.24, видим, что без самоокутывания скорость всплытия дымового факела после выхода из дымовой трубы значительно больше (примерно 2 м/с) и она имеет положительное значение, тогда как на начальном участке при наличии самоокутывания скорость всплытия отрицательна ($-0,3$ м/с) и лишь по мере уменьшения силы самоокутывания она постепенно приобретает положительное значение.

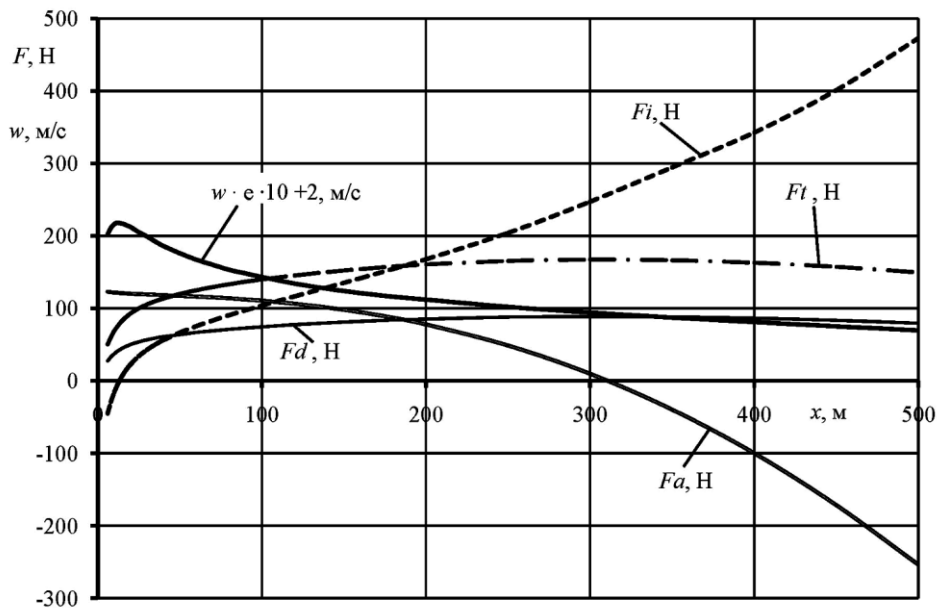


Рис. 3.24. Изменение действующих сил и скорости всплытия по длине факела без самоокутывания

По другому ведет себя и сила Архимеда. Если в самом начале траектории они в обоих вариантах они равны, то при отсутствии самоокутывания при более значительном подъеме дымовых газов сила Архимеда уменьшается за счет адиабатического охлаждения газозвдушной смеси при уменьшении атмосферного давления с высотой ($1\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$). Эта сила становится отрицательной, когда средняя температура газозвдушной смеси становится ниже температуры окружающего воздуха (при $x \geq 310\text{ м}$, $t_g < 1^{\circ}\text{C}$).

Отношение вертикальной оси к горизонтальной в случае отсутствия самоокутывания составляет примерно 0,5 (рис. 3.25), тогда как при наличии самоокутывания на начальном участке это отношение больше 2,0 и только при $x > 100\text{ м}$ становится меньше единицы. Это приводит к тому, что при отсутствии самоокутывания коэффициент давления значительно больше, чем при наличии самоокутывания (около 0,8 – рис. 3.25), тогда как при наличии самоокутывания его значение варьируется от 0,3 до 0,7 (см. рис. 3.22).

При отсутствии самоокутывания площадь поперечного сечения дымового факела значительно меньше и меньше объемные расходы, особенно на начальном участке, что приводит к разным температурам в дымовом факеле. Если в начале траектории средняя температура газозвдушной смеси в дымовом факеле при наличии самоокутывания составляла $8\text{--}9^{\circ}\text{C}$, то при отсутствии самоокутывания – $40\text{--}50^{\circ}\text{C}$, что с учетом также меньшего периметра поперечного сечения приводит к большему подъему дымового факела (рис. 3.26).

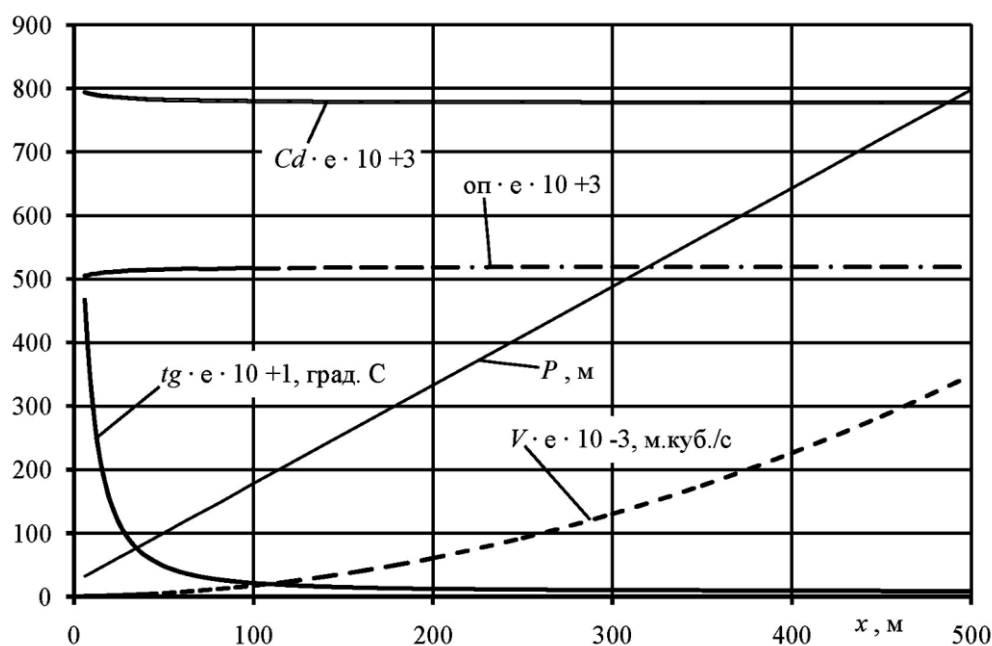


Рис. 3.25. Изменение характеристик дымового факела по его длине без самоокутывания

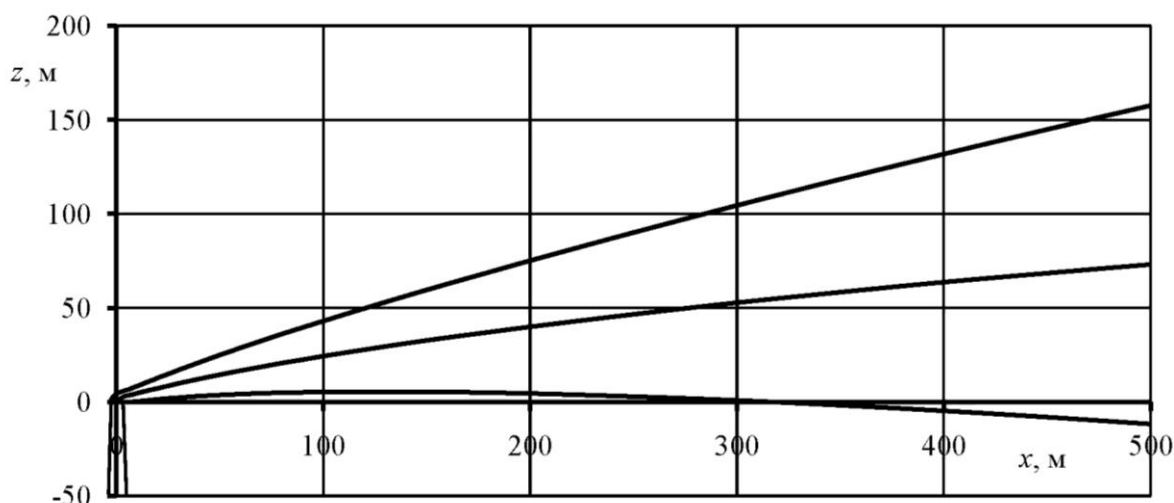


Рис. 3.26. Расчетная траектория дымового факела без самоокутывания

Сравнительные расчеты со схемой без самоокутывания позволяют выявить количественный вклад тех или иных факторов в изменение траектории и рассмотреть методы уменьшения влияния явления самоокутывания на снижение траектории дымового факела.

Контрольные вопросы

1. Объясните, от чего зависят условия формирования дымового факела.
2. Какой профиль температуры воздуха называется сверхадиабатическим?
3. Какой профиль температуры воздуха называется инверсионным?
4. Когда образуется парный вихрь в дымовом факеле?
5. Какой дымовой факел называется флагообразным?
6. Как изменяется давление в пограничном слое атмосферы?
7. Как изменяется скорость ветра в пограничном слое атмосферы?
8. Какие температурные профили могут наблюдаться в пограничном слое атмосферы?
9. Объясните, что называется сухадиабатическим температурным градиентом в атмосфере.
10. Назовите причины возникновения турбулентности в пограничном слое атмосферы.
11. Объясните, что называется эффективной высотой дымовой трубы.
12. Объясните, что называется зоной переброса дымового факела.

13. Расскажите, что такое условный точечный источник пассивной примеси.

14. Расскажите, от чего зависит подъем дымового факела при отсутствии ветра.

15. Перечислите основные силы, действующие в дымовом факеле.

16. Объясните, что такое гидродинамический участок подъема дымового факела.

17. Объясните, что такое участок теплового подъема дымового факела.

18. Расскажите, что представляет собой поперечное сечение дымового факела и от чего оно зависит.

19. В каких случаях траектория имеет волнообразный характер?

20. Поясните, когда имеет место самоокутывание оголовка дымовой трубы.

4. РАСЧЕТ ПРИЗЕМНЫХ КОНЦЕНТРАЦИЙ

4.1. Расчет загрязнения атмосферы выбросами одиночного источника при неблагоприятных метеорологических условиях

Концентрация вредных веществ в продуктах сгорания постепенно снижается за счет разбавления дымовых газов воздухом. Так, например, концентрация оксидов серы в продуктах сгорания, выбрасываемых из дымовой трубы при отсутствии сероочистки, может достигать до 20 г/м^3 , а предельно допустимая концентрация на уровне дыхания в двухметровом слое над поверхностью Земли должна быть не более $0,5 \text{ мг/м}^3$. Это значит, что в данном случае дымовая труба должна обеспечить разбавление дымовых газов не менее чем в 40 000 раз. Неблагоприятными метеорологическими условиями будем считать совпадение опасной скорости ветра, т. е. скорости, при которой у земли наблюдаются максимальные концентрации, с развитой турбулентностью атмосферы.

При этом рассматривается только локальное загрязнение воздуха, не учитывая его вклад в региональное или глобальное загрязнение атмосферы. Локальным загрязнением будем считать загрязнение воздуха на уровне дыхания на расстоянии не более 100 км от источника выброса.

Максимальное значение приземной концентрации вредного вещества c_m , мг/м^3 , при выбросе газовой смеси из одиночного точечного источника с круглым устьем достигается при неблагоприятных метеорологических условиях на расстоянии x_m , м, от источника и определяется по формуле [32]:

$$c_m = \frac{AMFmn\eta}{H^2 \sqrt[3]{V_1 \Delta T}}, \quad (4.1)$$

где A – коэффициент, зависящий от температурной стратификации атмосферы; M – масса загрязняющего вещества (ЗВ), выбрасываемого в атмосферу в единицу времени, г/с ; F – безразмерный коэффициент, учитывающий скорость оседания ЗВ в атмосферном воздухе; m и n – коэффициенты, учитывающие условия выхода газовой смеси из устья источника выброса; H – высота источника выброса над уровнем земли, м; η – безразмерный коэффициент, учитывающий влияние рельефа местности, в случае ровной или слабопересеченной местности

с перепадом высот, не превышающим 50 м на 1 км, $\eta = 1$; ΔT – разность между температурой выбрасываемой газовойдушной смеси и температурой окружающего атмосферного воздуха, °C; V_1 – расход газовойдушной смеси, м³/с:

$$V_1 = \frac{\pi D^2}{4} w_0, \quad (4.2)$$

где D – диаметр устья источника выброса, м; w_0 – средняя скорость выхода газовойдушной смеси из устья источника выброса, м/с.

Значение коэффициента A , соответствующее неблагоприятным метеорологическим условиям, принимается равным:

а) 250 – для Республики Бурятия и Забайкальского края;

б) 200 – для районов в Европейской территории РФ южнее 50° с. ш., остальных районов Нижнего Поволжья, Азиатской территории РФ, кроме указанных в пунктах а) и в);

в) 180 – для Европейской территории РФ и Урала от 50° с. ш. до 52° с. ш. включительно, за исключением попадающих в эту зону районов, перечисленных в пунктах а) и б), а также для районов Азиатской территории РФ, расположенных к северу от Полярного круга и к западу от меридиана 108° в.д.;

г) 160 – для Европейской территории РФ и Урала севернее 52° с. ш. (за исключением центра Европейской территории РФ);

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

Для источников выбросов, расположенных на расстоянии менее 3 км от административных границ, разделяющих территории с различными значениями коэффициента A , в расчетах принимается величина коэффициента, равная половине суммы указанных значений.

При определении значения ΔT следует принимать температуру окружающего атмосферного воздуха $T_{\text{в}}$, равной средней максимальной температуре наружного воздуха наиболее жаркого месяца года по [37], а температуру выбрасываемой в атмосферу газовойдушной смеси $T_{\text{г}}$ по действующим для данного производства технологическим нормативам. Для отопительных котельных, работающих только в зимний период, допускается принимать значения расчетной температуры окружающего атмосферного воздуха $T_{\text{в}}$ равными средним месячным температурам воздуха за самый холодный месяц.

Значение безразмерного коэффициента F принимается:

а) для газообразных вредных веществ и мелкодисперстных аэрозолей диаметром не более 10 мкм $F = 1$;

б) для аэрозолей (кроме указанных в п. а)) при среднем эксплуатационном коэффициенте очистки выбросов свыше 90 % – 2; от 75 до 90 % включительно – 2,5; менее 75 % и при отсутствии очистки – 3.

Вне зависимости от эффективности очистки значение коэффициента F принимается равным 3 при расчетах концентрации пыли в атмосферном воздухе для производств, в выбросах которых содержание водяного пара соответствует температуре точки росы, которая выше используемой в расчетах температуры атмосферного воздуха T_B на 5 °С и более.

Значения коэффициентов m и n для характерных значений выбросов через дымовые трубы ТЭС и районных котельных определяются в зависимости от следующих параметров:

$$v_M = 0,653 \sqrt[3]{\frac{V_1 \Delta T}{H}}, \quad (4.3)$$

$$v'_M = 1,3 \frac{w_0 D}{H}, \quad (4.4)$$

$$f = 1000 \frac{w_0^2 D}{H^2 \Delta T}, \quad (4.5)$$

$$f_e = 800 (v'_M)^3. \quad (4.6)$$

Коэффициент m определяется в зависимости от f по формуле:

$$m = \frac{1}{0,67 + 0,1\sqrt{f} + 0,34\sqrt[3]{f}} \quad \text{при } f < 100. \quad (4.7)$$

Коэффициент n при $f < 100$ определяется в зависимости от v_M по формулам:

$$n = 1 \quad \text{при } v_M \geq 2; \quad (4.8)$$

$$n = 0,532v_M^2 - 2,13v_M + 3,13 \quad \text{при } 0,5 \leq v_M < 2; \quad (4.9)$$

$$n = 4,4v_M \quad \text{при } v_M < 0,5. \quad (4.10)$$

Расстояние x_M , м, от источника выбросов, на котором приземная концентрация c_M , мг/м³, при неблагоприятных метеорологических условиях достигает максимального значения, определяется по формуле:

$$x_M = \frac{5-F}{4} dH. \quad (4.11)$$

Безразмерный коэффициент d при $f < 100$ находится по формулам:

$$d = 2,48 \left(1 + 0,28 \sqrt[3]{f_e} \right) \text{ при } v_M \leq 0,5; \quad (4.12)$$

$$d = 4,95 v_M \left(1 + 0,28 \sqrt[3]{f} \right) \text{ при } 0,5 < v_M \leq 2; \quad (4.13)$$

$$d = 7 \sqrt{v_M} \left(1 + 0,28 \sqrt[3]{f} \right) \text{ при } v_M > 2. \quad (4.14)$$

Значение опасной скорости u_M , м/с, на уровне флюгера (10 м от уровня земли), при которой достигается наибольшее значение приземной концентрации вредных веществ c_M в случае $f < 100$ определяется по формулам:

$$u_M = 0,5 \text{ при } v_M \leq 0,5; \quad (4.15)$$

$$u_M = v_M \text{ при } 0,5 < v_M \leq 2; \quad (4.16)$$

$$u_M = v_M \left(1 + 0,12 \sqrt{f} \right) \text{ при } v_M > 2. \quad (4.17)$$

Максимальное значение приземной концентрации приземного вещества c_{Mu} , мг/м³, при неблагоприятных метеорологических условиях и скорости ветра u , м/с, отличающейся от опасной скорости ветра u_M , м/с, определяется по формуле:

$$c_{Mu} = r c_M, \quad (4.18)$$

где r – безразмерная величина, определяемая в зависимости от отношения u/u_M по формулам:

$$r = 0,67(u/u_M) + 1,67(u/u_M)^2 - 1,34(u/u_M)^3 \text{ при } u/u_M \leq 1; \quad (4.19)$$

$$r = \frac{3(u/u_M)}{2(u/u_M)^2 - (u/u_M) + 2} \text{ при } u/u_M > 1. \quad (4.20)$$

При проведении расчетов следует использовать значения скорости ветра u в диапазоне от 0,5 м/с до $u_{м.р}$, где $u_{м.р}$ – максимальная расчетная скорость ветра, значение которой в данной местности в среднем многолетнем режиме превышает в 5% случаев.

Расстояние от источника выброса $x_{ми}$, м, на котором при скорости ветра u и неблагоприятных метеорологических условиях приземная концентрация вредных веществ достигает максимального значения $c_{ми}$, мг/м³, определяемая по формуле:

$$x_{ми} = px_{м}, \quad (4.21)$$

где p – безразмерный коэффициент, определяемый в зависимости от отношения $u/u_{м}$ по формулам:

$$p = 3 \text{ при } u/u_{м} \leq 0,25; \quad (4.22)$$

$$p = 8,43 \cdot (1 - u/u_{м})^5 + 1 \text{ при } 0,25 < u/u_{м} \leq 1; \quad (4.23)$$

$$p = 0,32u/u_{м} + 0,68 \text{ при } u/u_{м} > 1. \quad (4.24)$$

При опасной скорости ветра $u_{м}$ приземная концентрация вредных веществ c , мг/м³, в атмосфере по оси факела выброса на различных расстояниях x (м) от источника выброса определяется по формуле:

$$c = s_1 c_{м}, \quad (4.25)$$

где s_1 – безразмерный коэффициент, определяемый в зависимости от отношения $x/x_{м}$ и коэффициента F по формулам:

$$s_1 = 3(x/x_{м})^4 - 8(x/x_{м})^3 + 6(x/x_{м})^2 \text{ при } x/x_{м} \leq 1; \quad (4.26)$$

$$s_1 = \frac{1,13}{0,13(x/x_{м})^2 + 1} \text{ при } 1 < x/x_{м} \leq 8; \quad (4.27)$$

$$s_1 = \frac{x/x_{м}}{3,556(x/x_{м})^2 - 35,2(x/x_{м}) + 120} \text{ при } F \leq 1,5 \text{ и } x/x_{м} > 8; \quad (4.28)$$

$$s_1 = \frac{1}{0,1(x/x_{м})^2 + 2,47(x/x_{м}) - 17,8} \text{ при } F > 1,5 \text{ и } x/x_{м} > 8. \quad (4.29)$$

$$s_1 = 144,3(x/x_M)^{-7/3} \text{ при } x/x_M > 100 \text{ и } F \leq 1,5; \quad (4.30)$$

$$s_1 = 37,76(x/x_M)^{-7/3} \text{ при } x/x_M > 100 \text{ и } F > 1,5. \quad (4.31)$$

Аналогично определяется концентрация ЗВ на различных расстояниях по оси факела при неблагоприятных метеорологических условиях и других скоростях ветра $u \neq u_M$. Сначала по формулам (4.18) и (4.21) определяются величины c_{Mu} и x_{Mu} , соответственно. Затем в зависимости от отношения x/x_M определяется значение s_1 по формулам (4.26)–(4.31). Искомая концентрация ЗВ c определяется путем умножения c_{Mu} на s_1 .

Значение приземной концентрации вредных веществ в атмосфере c_y , мг/м³, на расстоянии y , м, по перпендикуляру к оси факела выброса определяется по формуле:

$$c_y = s_2 c, \quad (4.32)$$

где s_2 – безразмерный коэффициент, определяемый в зависимости от скорости ветра u , м/с, и отношения y/x по значению аргумента t_y :

$$t_y = \frac{uy^2}{x^2} \text{ при } u \leq 5; \quad (4.33)$$

$$t_y = \frac{5y^2}{x^2} \text{ при } u > 5 \quad (4.34)$$

по формуле:

$$s_2 = \frac{1}{\left(1 + 5t_y + 12,8t_y^2 + 17t_y^3 + 45,1t_y^4\right)^2}. \quad (4.35)$$

4.2. Расчет загрязнения атмосферы выбросами одиночного источника при текущих метеорологических условиях

Методика расчета приземных концентраций [32] применяется также при расчете необходимой высоты дымовой трубы, но она непригодна для расчета текущего загрязнения, создаваемого дымовой трубой в тех случаях, когда имеет место другое турбулентное состояние пограничного слоя, а также при наличии инверсионных слоев воздуха.

Как определяется турбулентное состояние в слое воздуха описано в п. 3.2.4. Для определения характера устойчивости слоя воздуха, выходящего за пределы приземного, на практике часто пользуются упрощенным аналогом числа Будыко:

$$B = \frac{\Delta t}{u^2}, \quad (4.36)$$

где Δt – разность температур воздуха на границах 100-метрового слоя воздуха; u – скорость ветра в середине этого слоя.

В зависимости от значения этого параметра по табл. 4.1 определяют класс устойчивости пограничного слоя атмосферы [40].

Таблица 4.1

Классы устойчивости пограничного слоя атмосферы

Значения параметра Б	Условия атмосферы	Класс устойчивости n
Менее –0,1	Сильная неустойчивость	Первый
От –0,1 до –0,035	Умеренная неустойчивость	Второй
От –0,035 до –0,005	Слабая неустойчивость	Третий
От –0,005 до 0,01	Безразличное состояние	Четвертый
От 0,01 до 0,060	Слабая устойчивость	Пятый
От 0,06 до 0,17	Умеренная устойчивость	Шестой
Более 0,17	Сильная устойчивость	Седьмой

Высота дымовой трубы определяется исходя из условий, характерных для жаркого летнего дня с умеренной скоростью ветра и соответствующих 1-му или 2-му классу устойчивости. Но большую часть времени имеют место другие условия турбулентного рассеяния примеси. Так, например, для ночи характерны условия, соответствующие 6-му или 7-му классу устойчивости.

Методика расчета приземных концентраций при заданных конкретных метеорологических условиях описана в работе [41].

В основу методики положена формула Лайхтмана [42]:

$$q(x, y) = \frac{\exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma^2(x)}\right)}{\sqrt{2\pi} \sigma(x)} q'(x), \quad (4.37)$$

где $q(x, y)$ – концентрация примеси на уровне земли в точке с координатами x, y . Начало координат расположено в точке проекции источника на поверхность земли. Ось x направлена вдоль среднего направления ветра, ось y – нормально к среднему ветру. Величина $q'(x)$ определяется на основании решений полуэмпирического уравнения диффузии невесомой примеси из линейного источника бесконечной длины, направленного вдоль оси y для стационарного случая. При этом используются степенные аппроксимации профиля коэффициента турбулентной диффузии и скорости ветра. Величина $\sigma(x)$ – рассеяние в поперечном направлении ветра, зависящее от времени осреднения.

Предполагается, что поверхность земли не поглощает примеси и не взаимодействует с ней. Для учета метеорологических параметров в явном виде формула (4.37) преобразована к виду:

$$q(x, y) = \frac{Q e^{-\frac{R}{x} - \frac{y^2}{2\sigma^2(x)}}}{\Gamma(1+\rho) \sqrt{2\pi} \sigma(x) U H} \left(\frac{R}{x} \right)^\rho, \quad (4.38)$$

где Q – массовый выброс газообразной примеси, г/с; H – эффективная высота дымовой трубы, м; $\Gamma(1+\rho)$ – гамма-функция; параметр $R = CH/B$, где C берется из табл. 4.2, параметр B – из табл. 4.3; $\sigma(x)$ – параметр поперечной диффузии:

$$\sigma(x) = bx,$$

где $b = b_0 (T/20)^{0,2}$; T – время осреднения, мин; b_0 определяется по табл. 4.4; ρ – параметр, берется из табл. 4.2; $\Gamma(1+\rho)$ – гамма-функция, берется по табл. 4.2; U – средняя в слое от 0 до H скорость ветра, м/с:

$$U = \int_0^H u(z) dz. \quad (4.39)$$

Профиль скорости ветра принимается равным:

$$u(z) = u_1 \left(\frac{z}{z_1} \right)^m, \quad (4.40)$$

где u_1 и z_1 – скорость ветра на известной высоте z_1 . Параметр m определяется по табл. 4.5.

Таблица 4.2

Значения расчетных параметров для формул (4.38), (4.41) и (4.45)

Класс устойчивости	H	C	ρ	$\Gamma(1+\rho)$	A	D
1-й и 2-й	Все	0,45	1	1,000	0,24	0,48
3-й	100	0,44	1	1,000	0,24	0,48
	200	0,38	0,9	0,962	0,22	0,54
4-й	100	0,43	1	1,000	0,22	0,49
	200	0,30	0,73	0,919	0,18	0,62
	300	0,25	0,53	0,888	0,16	0,73
5-й	25	0,43	1	1,000	0,21	0,51
	25...100	0,28	0,71	0,911	0,16	0,72
	100	0,24	0,55	0,889	0,14	0,73
6-й	25	0,40	1	1,000	0,20	0,54
	100	0,25	0,57	0,890	0,16	0,75
7-й	25	0,27	0,73	0,913	0,15	0,74
	100	0,24	0,60	0,893	0,15	0,78

Таблица 4.3

Величина параметра B для разных классов устойчивости

H	Класс устойчивости					
	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й	6-й и 7-й
25...70	0,050	0,030	0,020	0,012	0,005	0,0020
100...200	0,050	0,030	0,019	0,011	0,003	0,0015
200...300	0,050	0,028	0,015	0,010	0,003	0,0010
500	0,050	0,010	0,010	0,008	0,003	0,0010
1000	0,005	0,005	0,005	0,004	—	—

Таблица 4.4

Величина параметра b_0 для разных классов устойчивости

H	Класс устойчивости					
	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й	6-й и 7-й
20...100	0,21	0,17	0,15	0,13	0,08	0,06
100...300	0,15	0,13	0,12	0,08	0,06	0,05

Таблица 4.5

Величина параметра m для разных классов устойчивости

H	Класс устойчивости				
	1-й и 2-й	3-й	4-й	5-й	6-й и 7-й
25	0,10	0,12	0,15	0,16	0,25...0,32
25...100	0,10	0,13	0,15	0,19	0,32...0,40
100...300	0,11	0,13	0,13	0,23	0,36...0,50
300...500	0,11	0,13	0,13	0,25	—

Расстояние от трубы, при которой наблюдается максимально возможная концентрация рассчитывается по уравнению:

$$x_0 = A \frac{H}{B}. \quad (4.41)$$

Значение параметра A определяется по табл. 4.2.

По уравнению:

$$q_0 = D \frac{QB}{bUH^2} \quad (4.45)$$

определяют величину максимальной концентрации примеси (значение параметра D берется из табл. 4.2).

Вместо дискретного номера класса устойчивости атмосферы будем использовать непрерывную характеристику устойчивости атмосферы для 100-метрового слоя. В этом случае классы устойчивости, соответствующие значениям параметра $B = \Delta t_2 / (u_2)^2$, приведены в табл. 4.6.

Таблица 4.6

Классы устойчивости для 100-метрового участка
пограничного слоя атмосферы

Параметр Б	Условия атмосферы	Класс устойчивости n
Менее -0,1	Сильная неустойчивость	Первый
-0,06	Умеренная неустойчивость	Второй
-0,01	Слабая неустойчивость	Третий
0	Безразличное состояние	Четвертый
0,018	Слабая устойчивость	Пятый
0,1	Умеренная устойчивость	Шестой
Более 0,17	Сильная устойчивость	Седьмой

Далее были подобраны непрерывные функции (степенные многочлены), аппроксимирующие данные табл. 4.2–4.5 таким образом, чтобы сумма квадратов отклонений значений, приведенных в этих таблицах и рассчитанных по соответствующим уравнениям, была наименьшей.

Например, значения параметра b_0 , рассчитанные по аппроксимирующей формуле и используемые в дальнейших расчетах, приведены в табл. 4.7.

Таблица 4.7

Значения параметра b_0 после аппроксимации

H	Класс устойчивости					
	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й	6-й и 7-й
60	0,20	0,17	0,15	0,13	0,11	0,06
200	0,15	0,13	0,12	0,09	0,06	0,05

Результаты аппроксимации остальных параметров приведены в табл. 4.8 и 4.9.

Таблица 4.8

Значения параметра B после аппроксимации

H	Класс устойчивости					
	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й	6-й и 7-й
50	0,050	0,030	0,020	0,012	0,005	0,0020
150	0,050	0,030	0,019	0,011	0,003	0,0015
250	0,050	0,028	0,015	0,010	0,003	0,0010
500	0,050	0,010	0,010	0,008	0,003	0,0010
1000	0,005	0,005	0,005	0,004	0,003	0,0010

Таблица 4.9

Рассчитанные по аппроксимирующим формулам параметры рассеивания

Класс устойчивости	H	C	ρ	$\Gamma(1+\rho)$	A	D
1-й	Все	0,45	1	1,000	0,24	0,48
2-й	100	0,45	1	1,000	0,24	0,48
	1000	0,42	1	1,000	0,24	0,48
3-й	100	0,44	1	1,000	0,24	0,48
	200	0,38	0,9	0,961	0,22	0,54
4-й	100	0,38	1	1,000	0,22	0,49
	200	0,31	0,75	0,919	0,18	0,62
	300	0,26	0,53	0,887	0,16	0,73
5-й	25	0,42	1	1,000	0,21	0,51
	25...100	0,34	0,71	0,910	0,16	0,72
	100	0,28	0,55	0,889	0,14	0,73
6-й	25	0,40	1	1,000	0,20	0,54
	100	0,24	0,57	0,890	0,16	0,75
7-й	25	0,27	0,72	0,912	0,15	0,74
	100	0,24	0,60	0,893	0,15	0,78

Полученные аппроксимационные зависимости приняты за основу в программе расчета поля приземных концентраций по методике Бызовой. Эффективная высота дымовой трубы определяется на основании расчета траектории дымового факела для заданных метеорологических условий. Результаты расчета по данной методике для первого класса устойчивости близки к результатам расчета по методу, приведенному в [32].

Контрольные вопросы

1. Объясните, за счет чего снижается концентрация выбрасываемых из дымовой трубы вредных веществ в атмосфере.
2. Какое загрязнение воздуха считается локальным?
3. В каких районах коэффициент, зависящий от температурной стратификации атмосферы больше и почему?
4. Как расшифровывается СНиП?
5. Объясните, как влияет турбулентное состояние в слое воздуха на приземную концентрацию вредных примесей.
6. Объясните, что такое число Будыко.
7. Объясните, что такое класс устойчивости атмосферы.

5. УМЕНЬШЕНИЕ ВЫБРОСОВ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ

5.1. Характеристики летучей золы твердого топлива

Эффективность работы газоочистных устройств в большой степени зависит от физико-химических свойств улавливаемой золы и поступающих в золоуловитель дымовых газов. Основными характеристиками золы являются плотность, дисперсный состав, электрическое сопротивление (для электрофильтров), слипаемость. Плотность частиц летучей золы для большинства топлив лежит в пределах $\rho_{\text{ч}} = 1900 \dots 2500 \text{ кг/м}^3$, составляя в среднем для углей 2300 кг/м^3 [43].

Для выбора и расчета золоуловителя большое значение имеет распределение частиц по размерам – дисперсный состав. О величине частицы судят по размеру наименьшего отверстия сита, через которое частица диаметром d проходит при просеивании. Просеивая золу уноса через ряд сит с различным размером ячеек, получают кривую остатков на сите R_d (рис. 5.1).

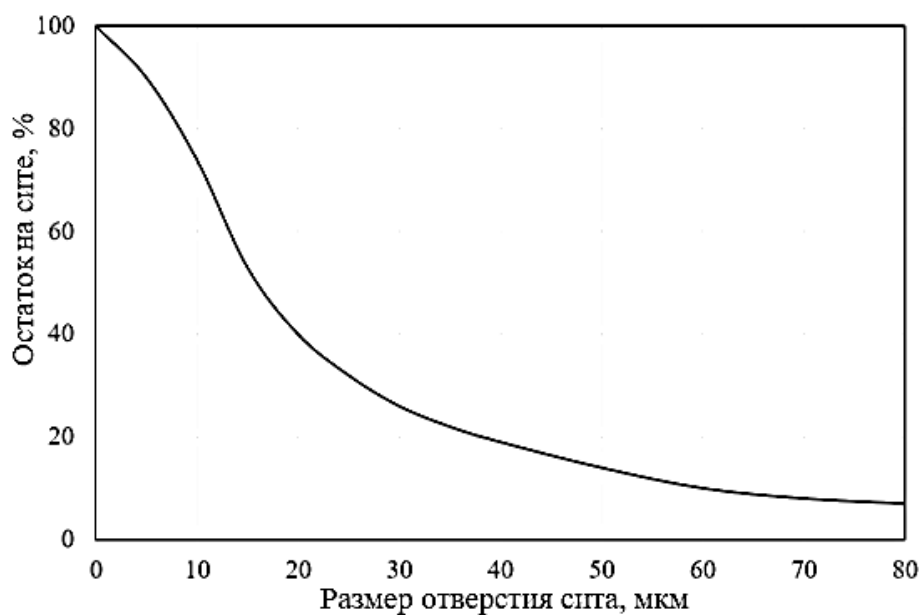


Рис. 5.1. Кривая остатков на сите

Ордината кривой показывает количество пыли в процентах, частицы которых больше, чем размер ячейки сита. Наименьший размер отверстий в ситах составляет 44 мкм, поэтому для определения дисперсного состава фракций меньше этого размера, представляющих наибольшие трудности при золоулавливании, используются другие методы – воздушной сепарации,

жидкостной седиментации и микроскопического анализа. По кривой остатков можно получить распределение золы по фракциям, т. е. по группам с примерно одинаковыми размерами.

Расчет степени улавливания обычно ведется для каждой фракции частиц отдельно. Содержание той или иной фракции Φ_i можно определить по кривой остатков на сите путем вычитания остатков на сите на концах заданного изменения диаметров частиц. В пределах рассматриваемого интервала диаметров частиц при расчете золоуловителей диаметр принимают постоянным, равным среднеарифметическому диаметру на его концах. Так, в диапазоне изменения диаметров от 10 до 20 мкм в расчетах принимают в качестве средней величину 15 мкм.

Дисперсный состав летучей золы связан с дисперсным составом сжигаемой угольной пыли, поступающей после размольного устройства в топку. Распределение частиц золы большинства углей соответствует логарифмически нормальному закону. В этом случае зависимость R_d от d в вероятностно-логарифмической шкале изображается прямой, а все распределение частиц по фракциям можно характеризовать двумя величинами: медианным диаметром d_{50} , соответствующим остатку на сите $R_d = 50 \%$, и средним квадратичным отклонением

$$\sigma = \frac{d_{50}}{d_{15,9}} = \frac{d_{84,1}}{d_{50}}, \quad (5.1)$$

где $d_{15,9}$, d_{50} , $d_{84,1}$ – диаметры частиц, которые соответствуют остаткам на ситах, равным 15,9; 50 и 84,1 %.

Для электрической очистки газов существенное влияние на эффективность работы электрофильтров оказывает величина удельного электрического сопротивления ρ . По этому признаку золу уноса умей можно разделить на три группы.

Первая группа характеризуется $\rho < 10^2$ Ом·м. Отличаясь высокой электропроводностью, при касании осадительного электрода зола этой группы быстро теряет отрицательный заряд и, становясь опять электрически нейтральной, может быть унесена движущимся потоком газа. Такими свойствами обладает зола, имеющая большое количество недогоревшего углерода, например зола донецкого антрацитового штыба (АШ).

Вторая группа золы имеет электрическое сопротивление в пределах $10^2 < \rho < 10^8$ Ом·м и наиболее полно улавливается в электрофильтрах. К этой группе относится зола большинства каменных углей.

Третья группа золы характеризуется $\rho > 10^8$ Ом·м и является электрическим изолятором, уменьшает напряженность поля в межэлектродном пространстве. При золе с высоким электрическим сопротивлением могут возникнуть явление обратной короны и вторичный унос осевшей золы. К золе этой группы относятся некоторые сорта каменных углей, в частности экибастузские, кузнецкие и др.

Для инерционных золоуловителей существенное значение имеет свойство слипаемости золы уноса. Различают не слипающуюся, слабо-, средне- и сильнослипающуюся золу. Зола с высокой слипаемостью забивает циклоны и мокрые золоуловители и плохо удаляется из бункеров. Это относится к золе АШ и в меньшей степени к золе бурых углей с малым количеством недожога.

Для мокрых золоуловителей большое значение имеет содержание в золе свободной окиси кальция СаО. При большом содержании СаО их работа становится невозможной из-за цементации золы.

5.2. Основные процессы при золоулавливании

Основным показателем работы золоуловителя является степень улавливания

$$\eta = \frac{G_{\text{ВХ}} - G_{\text{ВЫХ}}}{G_{\text{ВХ}}} = \frac{c_{\text{ВХ}} - c_{\text{ВЫХ}}}{c_{\text{ВХ}}}, \quad (5.2.)$$

где $G_{\text{ВХ}}$ – количество поступающей в золоуловитель в единицу времени золы, кг/с; $G_{\text{ВЫХ}}$ – количество выходящей (не уловленной) из золоуловителя в единицу времени золы, кг/с; $c_{\text{ВХ}}$ – концентрация золы в газе на входе в золоуловитель, кг/м³; $c_{\text{ВЫХ}}$ – то же на выходе, кг/м³. Для проведения расчетов более удобна другая величина – проскок (унос) золы через золоуловитель, определяемый из соотношения:

$$\varepsilon = \frac{G_{\text{ВЫХ}}}{G_{\text{ВХ}}} = \frac{c_{\text{ВЫХ}}}{c_{\text{ВХ}}}. \quad (5.3)$$

Между степенью улавливания и проскоком имеет место следующее соотношение:

$$\varepsilon = 1 - \eta. \quad (5.4)$$

Основные теоретические соотношения процесса золоулавливания наглядно показаны на рис. 5.2.

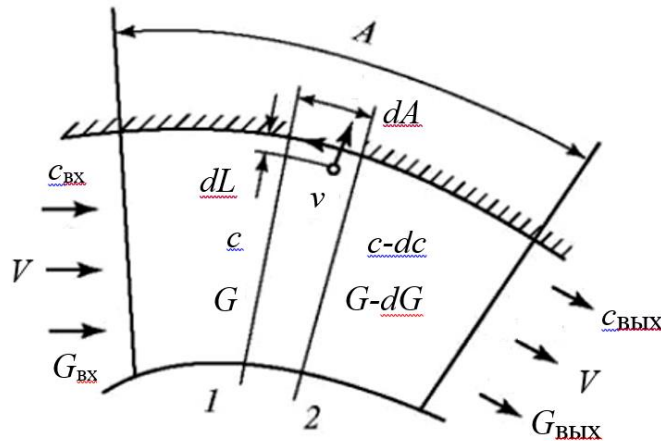


Рис. 5.2. Схема улавливания частицы золы

Предположим, что в канале золоуловителя поверхностью A , м^2 , движется поток газа с объемным расходом V , $\text{м}^3/\text{с}$, который остается постоянным и одинаковым как на входе, так и на выходе из золоуловителя, и со средней концентрацией золы на входе c_{BX} . Выберем в золоуловителе два бесконечно близких сечения, перпендикулярных движению основного потока, между которыми заключена поверхность осаждения dA (рис. 5.2). Если через сечение 1 в единицу времени прошла масса частиц G_1 , то из-за осаждения их масса в сечении 2 уменьшится до величины G_2 . Если принять, что средняя концентрация в сечении 1 составляла c , а в сечении 2 $(c - dc)$, то изменение массы в единицу времени на рассматриваемом участке составит:

$$dG = G_2 - G_1 = V(c - dc) - Vc = -Vdc. \quad (5.5)$$

Массу уловленных частиц между этими сечениями можно подсчитать по выражению:

$$dG = v c_A dA \quad (5.6)$$

где v – скорость движения частиц золы под действием сил осаждения к поверхности осаждения (скорость дрейфа), $\text{м}/\text{с}$; c_A – концентрация частиц вблизи поверхности осаждения, которая может существенно отличаться от средней концентрации частиц в рассматриваемых сечениях, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Приравнявая выражения (5.5) и (5.6) и разделяя переменные, получаем дифференциальное уравнение для золоуловителей:

$$\frac{dc}{c_A} = -\frac{v}{V} dA. \quad (5.7)$$

Пусть правая часть уравнения (5.7) есть дифференциал некоторой функции Π :

$$d\Pi = \frac{v}{V} dA. \quad (5.8)$$

Если скорость дрейфа частиц v остается неизменной вдоль всей поверхности осаждения, то выражение (5.89) легко интегрируется, и для функции Π получаем выражение:

$$\Pi = \frac{v}{V} A. \quad (5.9)$$

Функция Π называется параметром золоулавливания. Тогда общее дифференциальное уравнение золоулавливания примет вид:

$$\frac{dc}{c_A} = -d\Pi. \quad (5.10)$$

Если поток газов движется турбулентно, а частицы достаточно мелкие (менее 30 мкм) и активно участвуют в турбулентных пульсациях потока, то с известным допущением можно принять, что концентрация частиц у поверхности мало отличается от средней концентрации в рассматриваемом сечении золоуловителя, т. е. $c = c_A$. Тогда уравнение (5.10) приводится к виду:

$$\frac{dc}{c} = -d\Pi \quad (5.11)$$

и может быть проинтегрировано:

$$\int_{c_{\text{ВХ}}}^{c_{\text{ВЫХ}}} \frac{dc}{c} = - \int_0^{\Pi} d\Pi. \quad (5.12)$$

В результате получаем выражение для степени проскока:

$$\varepsilon = \frac{c_{\text{ВЫХ}}}{c_{\text{ВХ}}} = \exp(-\Pi). \quad (5.13)$$

Если частицы золы достаточно крупные и слабо участвуют в турбулентных пульсациях потока вследствие большой инерции, получаем другое решение. В этом случае можно принять, что

концентрация частиц у поверхности не меняется и остается равной средней концентрации во входном сечении золоуловителя, т. е. $c_A = c_{\text{вх}}$. При этом дифференциальное уравнение (5.10) принимает вид:

$$\frac{dc}{c_{\text{вх}}} = -d\Pi, \quad (5.14)$$

и после интегрирования имеем:

$$\varepsilon = 1 - \Pi. \quad (5.15)$$

На рис. 5.3 представлены зависимости проскока золы от параметра улавливания, построенные по приведенным выше уравнениям: кривая 1 – по уравнению (5.15); кривая 2 – по (5.13).

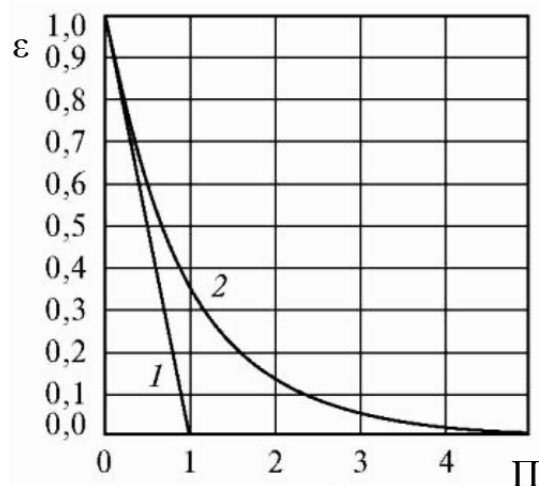


Рис. 5.3. Зависимость $\varepsilon = f(\Pi)$

Из рисунка видно, что мелкая пыль улавливается хуже, чем крупная.

Введем понятие удельной поверхности осаждения на 1 м³/с очищаемого газа:

$$f = \frac{A}{V}, \quad (5.16)$$

тогда параметр золоулавливания примет вид:

$$\Pi = \nu f. \quad (5.17)$$

Если положим в (5.9)

$$V = u\omega, \quad (5.18)$$

то получим параметр золоулавливания в виде произведения двух безразмерных параметров:

$$\Pi = K\Phi, \quad (5.19)$$

где $K = v/u$ – кинематический параметр, являющийся отношением скорости дрейфа частиц золы на поверхность осаждения к средней скорости потока газов в золоуловителе; $\Phi = A/\omega$ – геометрический параметр (параметр формы) золоуловителя, представляющий собой отношение поверхности осаждения к поперечному сечению для прохода газов.

Приведенные общие соотношения для степени улавливания в золоуловителях получены при следующих допущениях: каждая частица золы, достигнув осаждающей поверхности, не может возвратиться обратно в поток (отсутствует вторичный унос); все частицы имеют одинаковую скорость осаждения (дрейфа); распределение скоростей газа по сечению потока является равномерным. При реальных условиях эти допущения выполняются только с некоторой степенью приближения, поэтому в расчетах золоуловителей приходится вводить эмпирические поправки.

Учитывая, что улавливаемые частицы имеют различные размеры и у каждой своя скорость дрейфа, расчет величины проскока следует вести для каждой фракции отдельно. По данным рассевки золы выделяют фракции золы, внутри которых диаметр, а следовательно, и скорость дрейфа, меняется не сильно. Для каждой фракции Φ_i подсчитывается значение скорости дрейфа v_i и по ней степень фракционного проскока ε_i . Общий проскок золы определяется как сумма массовых проскоков всех фракций.

Если последовательно установлено несколько ступеней золоулавливания, то проскок некоторой фракции через все ступени определяется по выражению:

$$\varepsilon_i = \varepsilon_{i1} \cdot \varepsilon_{i2} \cdot \varepsilon_{i3}, \quad (5.20)$$

где ε_{i1} , ε_{i2} , ε_{i3} – проскок i -й фракции через первую, вторую и третью ступени золоулавливания.

5.3. Сухие инерционные золоуловители

На относительно небольших котлах могут применяться сухие инерционные золоуловители. На рис. 5.4 показан батарейный циклон, на котором может быть достигнута степень улавливания золы $\eta = 0,92$ [44].

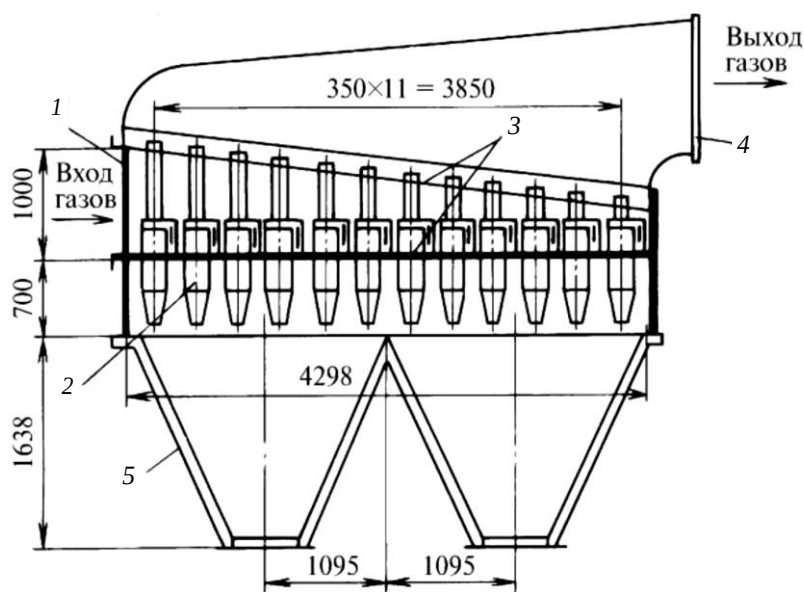
Газ поступает в циклон тангенциально и движется по окружности в канале, образованном внешней и внутренней цилиндрическими поверхностями циклона. Под действием центробежных сил зола отбрасывается к внешней стенке циклона, попадает в пограничный слой потока и под действием силы тяжести постепенно дрейфует вниз в коническую воронку и далее в общий бункер. Очищенный газ удаляется через внутренний цилиндр вверх.

Практический параметр золоулавливания для циклонов определяется по выражению:

$$\Pi_i = k \sqrt{\frac{u}{4,5}} \sqrt[3]{d_i^2}, \quad (5.21)$$

где k – коэффициент, учитывающий тип циклона: $k = 0,3$ для батарейных циклонов с циклонами типа розетки БЦ, $k = 0,5$ для циклонов с улиточным подводом типа БЦУ; u – скорость газов, отнесенная к поперечному сечению циклона, м/с. Рекомендуется принимать $u = 4,5$ м/с.

Гидравлическое сопротивление батарейных циклонов может составлять 500...700 Па. Батарейный циклон состоит из корпуса с бункером, циклонов, нижней опорной решетки, верхней трубной доски и тракта выгрузки пыли (рис. 5.4, а). Типоразмеры батарейных циклонов стандартизированы. Корпус батарейного циклона, как правило, выполняется секционированным. На ТЭС наибольшее распространение получили батарейные циклоны с тангенциальным улиточным подводом газа типа «Энергоуголь» с внутренним диаметром 231 мм.



а

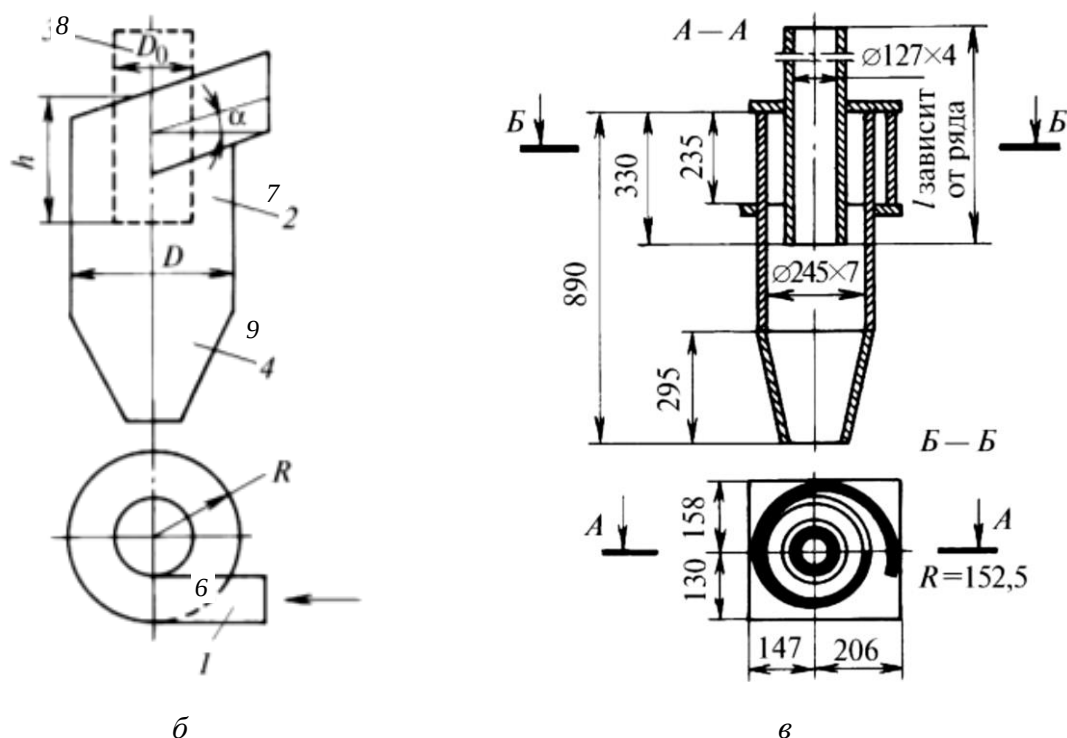


Рис. 5.4. Батарейный циклон БЦУ типа «Энергоуголь» (а), принципиальная схема (б) и элемент (в) батарейного циклона: 1 – входной патрубок для запыленного газа; 2 – циклонный элемент; 3 – трубные доски; 4 – выходной патрубок очищенного газа; 5 – бункер для золы; 6 – входной патрубок для запыленного газа; 7 – корпус циклона (поверхность золоулавливания); 8 – выходной патрубок очищенного газа; 9 – бункер для золы

Батарейные циклоны не рекомендуется применять при высокой слипаемости золы, что может приводить к их забиванию.

5.4. Мокрые инерционные золоуловители

Более высокую эффективность улавливания можно получить при применении устройств с предварительным увлажнением золы. Влажные частицы золы при взаимных столкновениях прилипают друг к другу, в результате чего образуется конгломерат с массой, превышающей первоначальную массу частицы в сотни раз. Интенсивные столкновения частиц обеспечивают различного рода турбулизаторы потока. Это могут быть как прутковые решетки, так и сопла Вентури. Мокрые золоуловители применяются на котлах паропроизводительностью до 640 т/ч. Их можно устанавливать, если приведенная сернистость топлива $S^{пр} < 0,3 \%$, щелочность золы не более 20%, жесткость воды не более 15 мг-экв/кг,

а температура газов находится в пределах $120...200\text{ }^{\circ}\text{C}$ [40]. Из-за налипания применение мокрых золоуловителей не рекомендуется, если установлены дымососы с загнутыми назад лопатками.

На рис. 5.5 показан мокрый инерционный золоуловитель с прутковой решеткой. Прутковая решетка устанавливается в подводящем газоходе, который имеет уклон $5\text{--}10^{\circ}$ для стекания воды в каплеуловитель непосредственно перед скруббером.

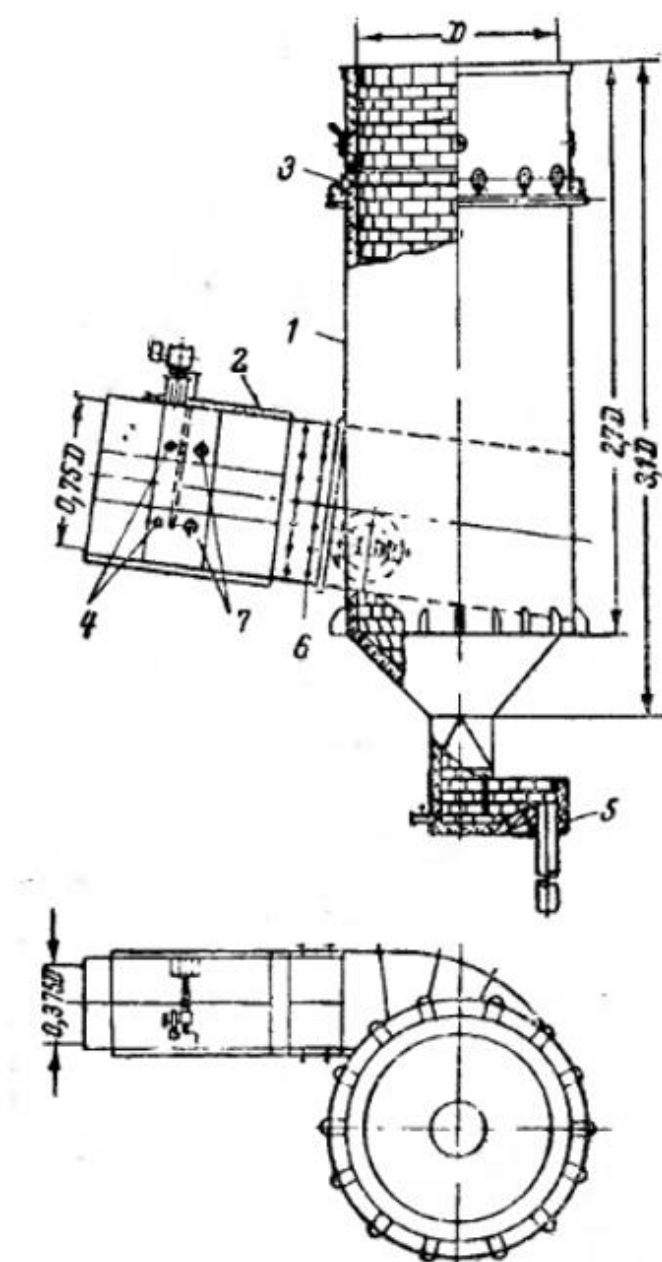


Рис. 5.5. Мокрый прутковый золоуловитель: 1 – корпус; 2 – входной патрубок; 3 – оросительные сопла; 4 – смывные сопла; 5 – гидрозатвор; 6 – прутковая решетка; 7 – оросительные форсунки прутковой решетки

Перед решеткой устанавливаются оросительные и смывные сопла. Отложения золы в прутковой решетке периодически удаляются смывными соплами.

Оросительные сопла установлены также в скруббере, которые создают непрерывную пленку воды на внутренней поверхности скруббера.

Давление воды на оросительных соплах составляет 2 кг/см^2 , на смывных – 25 кг/см^2 . Степень улавливания золы в таком золоуловителе составляет 91...92 %.

Более высокую степень улавливания имеют мокрые золоуловители с коагулятором Вентури (рис. 5.6). Они не забиваются золой и имеют степень улавливания 95...98 % при скорости газов в горловине 60...80 м/с и орошении до $0,13 \text{ м}^3$ воды на $1\,000 \text{ м}^3$ газа. Основным недостатком таких золоуловителей является его высокое гидравлическое сопротивление, составляющее от 800 до 1 100 Па.

Параметр золоулавливания для мокрых золоуловителей с предварительной коагуляцией золы определяется по формуле:

$$\Pi = \sqrt{q_{\text{ж}} u_{\text{г}}}, \quad (5.22)$$

где $q_{\text{ж}}$ – удельный расход орошающей жидкости, кг/м^3 ; $u_{\text{г}}$ – скорость газов в горловине трубы Вентури, м/с. Обычно $q_{\text{ж}}$ принимается в пределах $0,12...0,20 \text{ кг/м}^3$, а $u_{\text{г}}$ – 50...70 м/с.

$$t_{\text{yx}} \geq t_{\text{p}} + 21. \quad (5.23)$$

Это единственный вид золоуловителей, в котором эффективность очистки не зависит от исходного размера частиц. В первом приближении можно принять, что все частицы улавливаются одинаково, и их дисперсный состав не учитывать.

При контакте с водой имеет место достаточно существенное охлаждение дымовых газов (на 40...50 °С). Если температура уходящих дымовых газов t_{yx} окажется ниже температуры точки росы t_{p} , °С, возможна интенсивная низкотемпературная коррозия газового тракта котла.

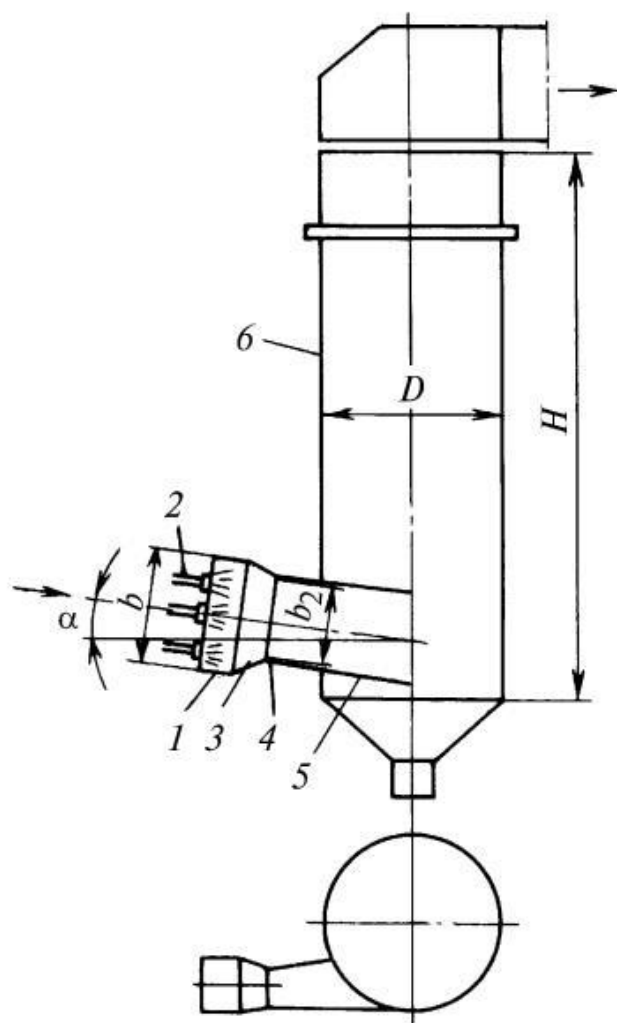


Рис. 5.6. Мокрый инерционный золоуловитель с коагулятором Вентури: 1 – входной патрубок запыленного газа; 2 – подача воды через оросительные сопла; 3–5 – конфузор, горловина и диффузор коагулятора Вентури; 6 – скруббер-каплеуловитель

5.5. Электрофилтры

В качестве золоуловителей на ТЭС широкое применение нашли электрофилтры, имеющие степень улавливания золы 99,0...99,8 % при гидравлическом сопротивлении порядка 200 Па. Капитальные затраты на сооружение электрофилтров высоки, так как эти аппараты металлоемки, занимают большую площадь, снабжаются специальными повышающе выпрямительными агрегатами электропитания.

В электрофилтрах запыленный газ движется в каналах, образованных осадительными электродами, между которыми расположены через определенное расстояние коронирующие электроды. К электродам подается постоянный ток высокого напряжения, на коронирующие

электроды – минус, на осадительные – плюс (заземлены). При определенной напряженности электрического поля происходит ионизация дымовых газов, сопровождающаяся возникновением коронного разряда, при котором быстро нарастает стекание электронов с коронирующего электрода. Интенсивность потока электронов зависит от кривизны поверхности истечения. С увеличением кривизны поток электронов нарастает. Поэтому коронирующие электроды делают игольчатыми. В результате в межэлектродном пространстве возникает электрический ток, называемый током короны. Частицы золы, сталкиваясь с электронами, приобретают электрический заряд и под действием электрического поля двигаются к развитой поверхности осадительных электродов. При коронном разряде образуется также некоторое количество и положительно заряженных ионов, поэтому небольшая часть золы оседает также и на коронирующих электродах. Через определенные промежутки времени с помощью ударного механизма происходит встряхивание электродов, и частички золы под действием силы тяжести падают в бункер.

Коронный разряд возникает при достижении определенной напряженности электрического поля, называемой критической. С увеличением напряженности выше критической ток короны увеличивается и эффективность улавливания золы возрастает. Однако при дальнейшем росте напряженности электрического поля произойдет пробой межэлектродного пространства искровым или дуговым электрическим зарядом. Таким образом, для электрической очистки дымовых газов необходимо выполнение условия:

$$E_{кр} < E < E_{пр}, \quad (5.24)$$

где $E_{кр}$ и $E_{пр}$ – критическая и пробойная напряженности электрического поля.

На рис. 5.7 представлен электрофильтр марки ЭГА.

Дымовые газы после распределительной решетки поступают в коридоры, образованные вертикально висящими широкополосными осадительными электродами.

Осадительные и коронирующие электроды объединяются по ходу движения газов в поля длиной от 2,56 до 5,12 м. В зависимости от требуемой степени очистки газов число полей может быть от двух до пяти.

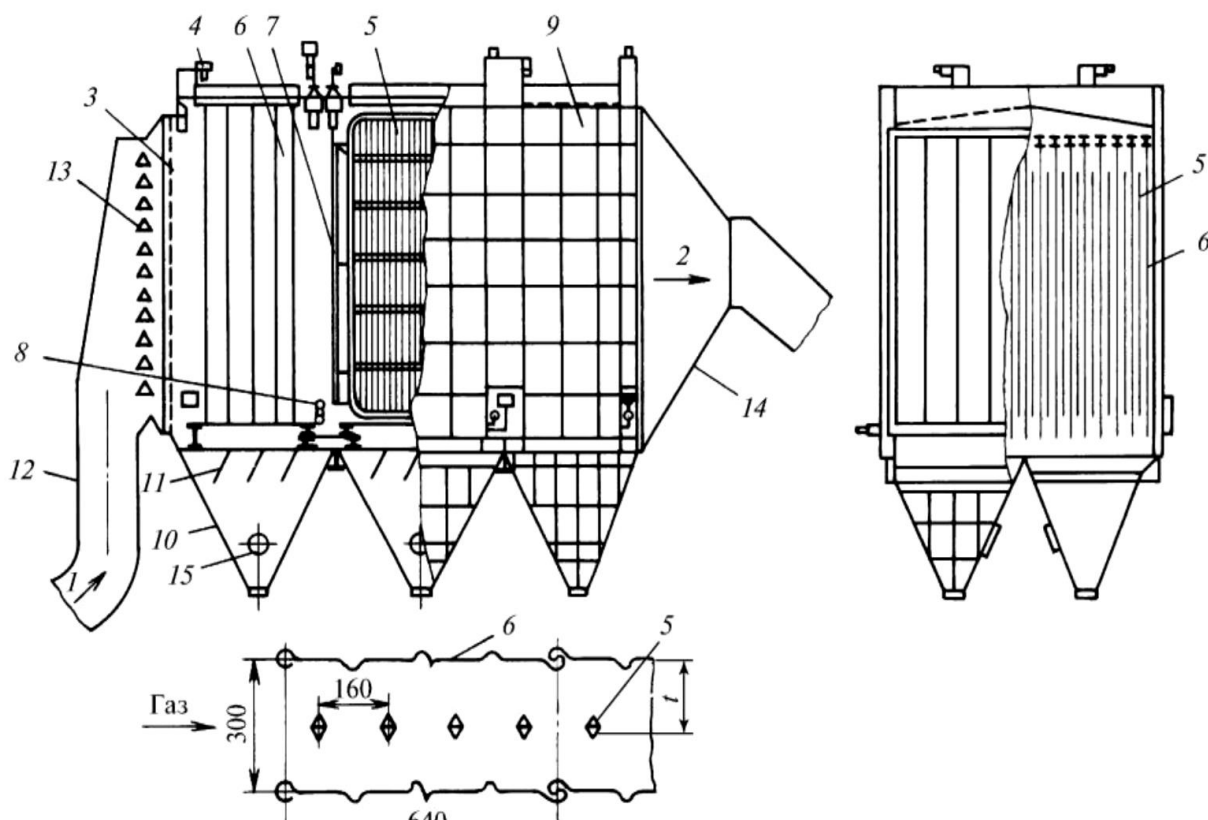


Рис. 5.7. Трехпольный двухсекционный электрофильтр: 1 – вход запыленного газа; 2 – выход очищенного газа; 3 – газораспределительная решетка; 4 – подвод тока высокого напряжения; 5 – коронирующий электрод; 6 – осадительный электрод; 7 – встряхивающий механизм коронирующих электродов; 8 – встряхивающий механизм осадительных электродов; 9 – корпус; 10 – бункер; 11 – перегородки для уменьшения перетоков газа через бункер; 12 – подъемная шахта; 13 – газораспределительные объемные элементы; 14 – конфузрный отвод дымовых газов; 15 – смотровые люки в бункерах; t – расстояние между коронирующим и осадительным электродами, м

Увеличение числа полей повышает степень улавливания золы, однако это приводит к возрастанию расхода металла, габаритных размеров и стоимости электрофильтра. Осадительные электроды набираются из стандартных элементов шириной 640 мм. Число элементов может изменяться от четырех до восьми.

Корпус электрофильтра выполняется металлическим. Под каждым полем электрофильтра установлен бункер для сбора уловленной золы. Подвод электрического тока высокого напряжения к электрофильтру (60...80 кВ) осуществляется агрегатами питания. Агрегат питания состоит из регулятора напряжения, повышающего трансформатора и выпрямителя. Для обеспечения оптимального режима питания напряжение на электродах должно поддерживаться на максимально высоком уровне, но ниже пробивного. Процесс регулирования напряжения на электродах

электрофильтра автоматизирован. Для регулирования выходного тока и напряжения используются магнитные усилители и тиристоры. Агрегаты питания оснащаются полупроводниковыми выпрямителями.

Предположим, что скорость улавливания золы прямо пропорциональна массовому расходу золы G и скорости движения частицы к осадительному электроду (скорости дрейфа) v и обратно пропорциональна расстоянию t между коронирующим и осадительным электродами (см. рис. 5.7). Тогда можно записать, что

$$-\frac{dG}{d\tau} = G \frac{v}{t}. \quad (5.25)$$

Знак минус говорит о том, что количество золы уменьшается. Запишем уравнение скорости движения запыленных газов w , м/с:

$$w = \frac{dx}{d\tau}, \quad (5.26)$$

где x – расстояние по ходу движения газов, м; τ – время прохождения запыленным потоком участка x , с.

Отсюда

$$d\tau = \frac{dx}{w}. \quad (5.27)$$

Подставив (5.27) в (5.25) и разделив переменные, получим

$$-\frac{dG}{G} = \frac{v}{tw} dx. \quad (5.28)$$

Полагая в пределах электрофильтра $v = \text{const}$, $t = \text{const}$ и $w = \text{const}$, проинтегрируем выражение (5.28):

$$\int_{\text{ВХ}}^{\text{ВЫХ}} \frac{dG}{G} = -\frac{v}{tw} \int_0^L dx, \quad (5.29)$$

где L – длина электрофильтра, м.

Решая уравнение (5.29), получим

$$\ln \frac{G_{\text{ВЫХ}}}{G_{\text{ВХ}}} = -\frac{vL}{tw}. \quad (5.30)$$

Учитывая, что $\frac{G_{\text{ВЫХ}}}{G_{\text{ВХ}}} = \varepsilon$, запишем:

$$\varepsilon = \exp\left(-\frac{vL}{tw}\right). \quad (5.31)$$

Скорость дрейфа в электрофильтре значительно зависит от удельного электрического сопротивления золы ρ . На рис. 5.8, а показано изменение скорости дрейфа в зависимости от удельного электрического сопротивления. В области $\rho = 10^8 \dots 10^9$ Ом·м происходит резкое падение скорости дрейфа, что связано с образованием «обратной короны». Сущность этого явления заключается в том, что на слое золы с высоким удельным электрическим сопротивлением, осевшей на осадительном электроде, происходит большое падение напряжения, а в газовом промежутке его падение уменьшается. Падение напряженности электростатического поля приводит к снижению скорости дрейфа и снижению степени улавливания золы. Кроме того, при превышении некоторого критического значения напряженности электрического поля в слое золы происходит пробой пористого слоя, в результате которого образуется тонкий канал, заполненный положительными ионами. Канал выполняет роль острия, с которого развивается мощный обратный коронный разряд, действующий навстречу основному. В межэлектродное пространство выбрасываются положительно заряженные ионы, которые нейтрализуют отрицательно заряженные частички золы, двигавшиеся к осадительному электроду. В результате этого зола опять становится электрически нейтральной, уносится потоком газа и эффективность улавливания золы резко снижается.

Удельное электрическое сопротивление золы зависит от температуры и влажности газов, от химического состава дымовых газов. Микросодержание некоторых примесей может существенно влиять на снижение удельного электрического сопротивления золы (например, концентрация SO_3).

Для повышения эффективности улавливания золы с высоким удельным электрическим сопротивлением разработан ряд методов. На рис. 5.8, б показана зависимость удельного электрического сопротивления золы от температуры дымовых газов, из которой видно, что в области наиболее типичных температур уходящих газов ($t_{\text{yx}} = 140 \dots 160$ °C) наблюдается максимум удельного электрического сопротивления золы. С ростом или снижением температуры от указанных значений происходит уменьшение электрического сопротивления золы.

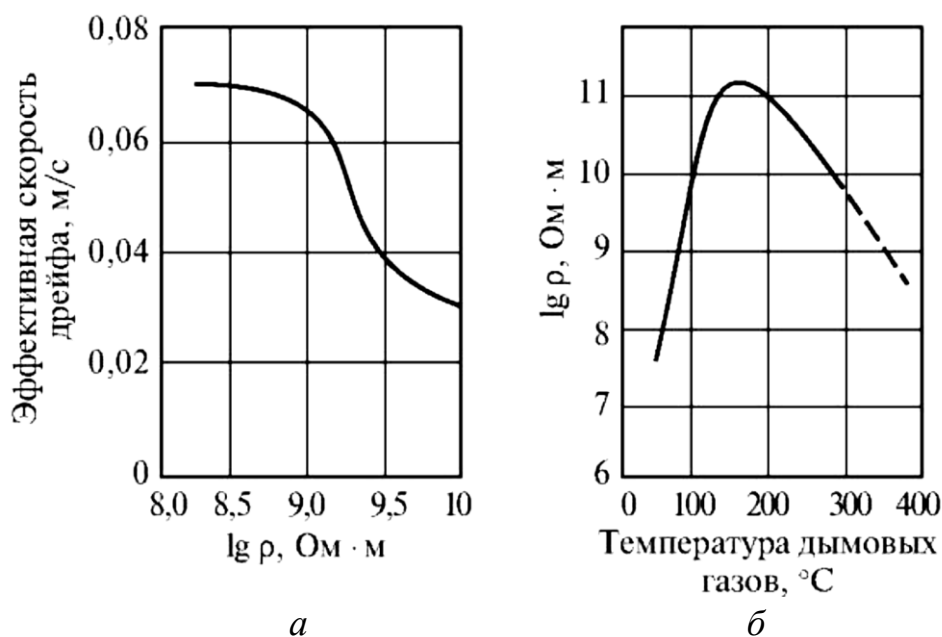


Рис. 5.8. Влияние температуры газов на скорость дрейфа

Использование правой высокотемпературной ветви характеристики возможно при установке электрофильтров перед воздухоподогревателем в зоне температур дымовых газов 350...400 °С. Однако этот путь является нерентабельным в связи со значительным увеличением объемного расхода дымовых газов, что вызывает необходимость увеличения габаритных размеров электрофильтра и приводит к усложнению конструкции его элементов при высоких температурах.

Для снижения удельного электрического сопротивления золы получило практическое применение температурно-влажностное кондиционирование дымовых газов, которое может осуществляться как за счет установки перед электрофильтром мокрого скруббера, так и за счет подачи воды перед электрофильтром через специальные мелкодисперсные форсунки. Температурно-влажностное кондиционирование дымовых газов приводит к снижению температуры газов до 80...90 °С. При этом зола адсорбирует своей поверхностью влагу и различные химические вещества, в первую очередь серный ангидрид. Это приводит к снижению удельного электрического сопротивления и повышению эффективности улавливания золы. При применении этого метода очень важным является обеспечение мелкодисперсного распыла влаги во всем объеме дымовых газов, чтобы она успела испариться до входа в электрофильтр. В противном случае это приведет к повышенной коррозии элементов электрофильтра.

Другой путь снижения удельного электрического сопротивления золы заключается в применении химического кондиционирования дымовых газов микродозами серного ангидрида. Так, при подаче в дымовые газы SO_3 в количестве 20 ppm (20 миллионных долей по объему) удельное электрическое сопротивление золы снижается и удается предотвратить образование обратной короны.

Несмотря на эффективность химического кондиционирования этот метод пока не получил распространения в России из-за эксплуатационных трудностей и затрат, связанных с получением и подачей в котел тех или иных агрессивных веществ.

Предотвратить образование обратной короны или снизить ее интенсивность можно путем подачи на электроды импульсного напряжения и питания электрофильтра напряжением переменной полярности. Эти способы находятся в стадии опытной проверки.

Для повышения эффективности улавливания золы с высоким удельным электрическим сопротивлением применяются пониженные скорости газов в электрофильтре. Это приводит к увеличению габаритных размеров электрофильтра и повышению его стоимости, но позволяет компенсировать неблагоприятное воздействие обратной короны. Так, если для обычной золы скорость газов в электрофильтре принимается равной 1,5...1,8 м/с, то при высоком удельном электрическом сопротивлении она равна 1,0...1,2 м/с.

Из распространенных в России углей высокое удельное электрическое сопротивление имеют золы экибастузских и кузнецких углей.

На степень улавливания золы большое влияние оказывает равномерность распределения скоростей дымовых газов по сечению электрофильтра, которую можно оценить с помощью степени заполнения объема электрофильтра m :

$$m = \frac{\left(\sum_{i=1}^n w_i \right)^2}{n \sum_{i=1}^n |w_i| \cdot w_i}, \quad (5.32)$$

где w_i – скорость газов в i -м участке поперечного сечения на входе в электрофильтр; n – количество таких равновеликих участков.

Такая запись скоростей в знаменателе позволяет учесть наличие обратных токов и вихрей на входе в электрофильтр. От степени заполнения объема электрофильтра зависит величина проскока золы:

$$\varepsilon_d = \varepsilon^m, \quad (5.33)$$

где ε_d – действительное значение проскока с учетом неравномерности поля скоростей; ε – теоретическое значение проскока при равномерном поле скоростей.

Для выравнивания поля скоростей разработаны специальные устройства (рис. 5.9).

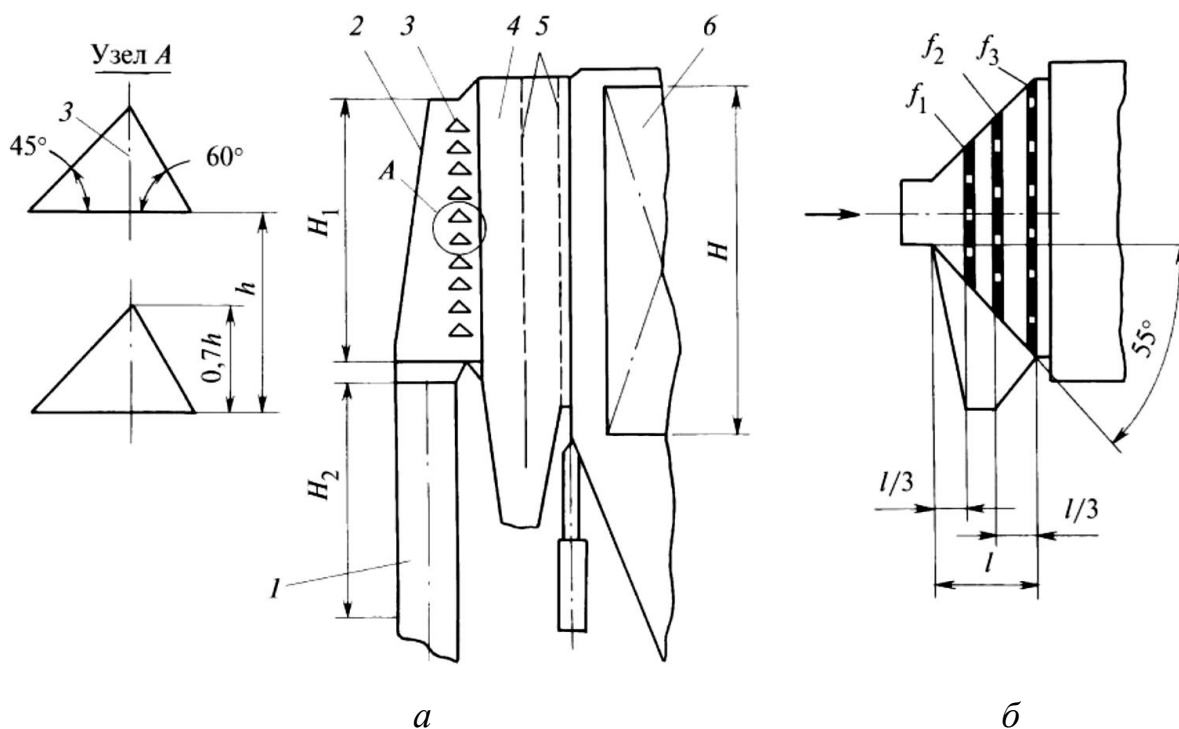


Рис. 5.9. Газораспределительные устройства для электрофильтров: *а* – газораспределительное устройство МЭИ для подвода газов снизу; *б* – газораспределительное устройство с диффузором при горизонтальном подводе газов; 1 – подъемная шахта; 2 – скошенная часть подъемной шахты; 3 – решетка из объемных элементов; 4 – форкамера; 5 – перфорированные плоские газораспределительные решетки с живыми сечениями $f_1 = 0,7$, $f_2 = f_3 = 0,5$; 6 – активное поле электрофильтра

При подводе газов к электрофильтру снизу применяется газораспределительное устройство МЭИ (рис. 5.9, *а*), состоящее из вертикальной подъемной шахты постоянного сечения 1, объемной решетки *А* и двух плоских решеток 5. Объемная решетка устанавливается для разворота газов к электрофильтру. Объемные элементы разделяют входную камеру по высоте на ряд горизонтальных каналов, каждый из которых представляет собой сначала конфузор, а затем диффузор. Нижние стенки каналов (боковые стороны треугольных элементов), выполненные наклонными, предотвращают отложения на них золы

(углы при основании треугольников приняты равными на входе 45° , на выходе 60°). Для того чтобы расход газов через все каналы, образованные объемными элементами, был одинаковым, верхний участок подъемной шахты выполняется со скошенной передней стенкой.

Живое сечение объемной решетки f принимается равным $0,25 \dots 0,35$. За объемной решеткой поток принимает горизонтальное направление и проходит практически по нормам через две плоские решетки. Каждая плоская решетка имеет живое сечение равное $0,5$.

При прямом подводе газов к электрофильтру (рис. 5.9, б) применяется диффузор с умеренным углом раскрытия, в котором устанавливаются плоские решетки (от одной до трех).

Снижение эффективности золоулавливания вызывает движение пылегазового потока вне активных зон электрофильтра. Основная часть газов движется в активной зоне электрофильтра в пространстве между осадительными и коронирующими электродами, где происходит зарядка и осаждение частиц золы. Однако часть газов может двигаться в неактивных и полуактивных зонах электрофильтра. Неактивными зонами электрофильтра являются области над электродной системой и под ней (вместе с пылесборными бункерами), а также промежутки между крайними осадительными электродами и корпусом электрофильтра. В неактивных зонах отсутствует напряженность электрического поля и зола не улавливается. Наибольшие протечки газов происходят через нижнюю неактивную зону электрофильтра ниже электродной системы. Выполнить глухое перекрытие неактивных зон не представляется возможным в связи с необходимостью соблюдения пробойных промежутков и сохранения зазоров между корпусом и электродами для нормального встряхивания.

В современных конструкциях электрофильтров высота коронирующих электродов выполняется несколько меньшей, чем осадительных. Зона, где есть осадительный электрод и отсутствует коронирующий, имеет ослабленное электрическое поле и называется полуактивной. Проскок золы в полуактивной зоне в $2 \dots 3$ раза выше, чем в активной.

Для снижения протечек газов через нижнюю неактивную зону применяются перегородки внутри бункеров (рис. 5.10).

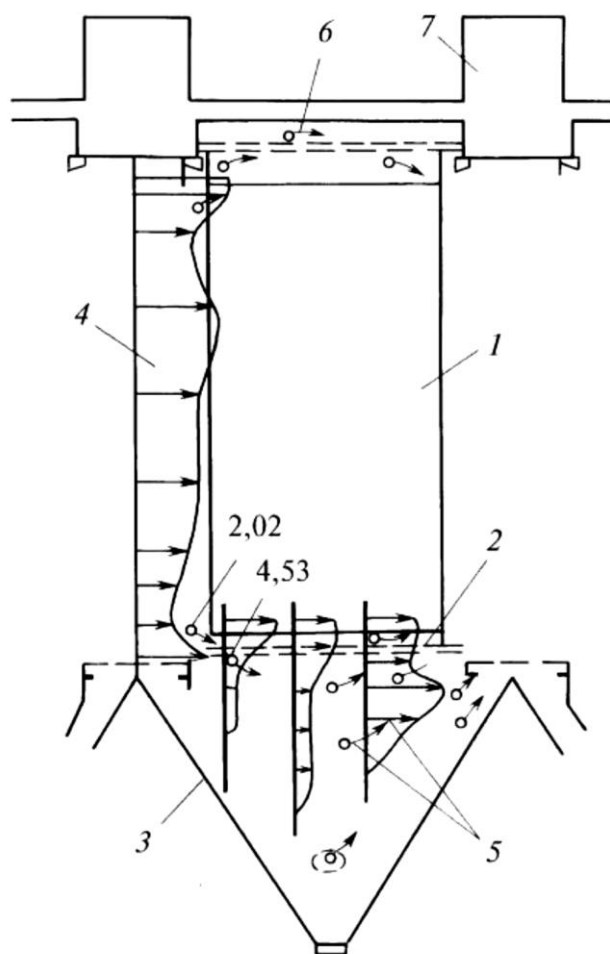


Рис. 5.10. Схема движения пылегазового потока через неактивные зоны: 1 – активная зона; 2 – полуактивная зона; 3 – бункер; 4 – поле скоростей в активной зоне; 5 – поля скоростей и направления движения потока в нижней (бункерной) неактивной зоне; 6 – движение потока в верхней неактивной зоне; 7 – изоляторные коробки

Эффективность улавливания золы зависит от режима встряхивания электродов. Промежутки времени между встряхиваниями должны быть оптимизированы для каждого поля, так как в каждом последующем поле количество осаждаемой золы уменьшается и, следовательно, длительность периода встряхивания должна увеличиваться. При степени улавливания $\eta = 0,98$ длительность интервала между встряхиваниями у второго поля 3-польного электрофилтра примерно в 4 раза больше, чем у первого поля, а для 3-го – в 14 раз больше.

Параметр золоулавливания при равномерном поле скоростей Π определяется из эмпирического соотношения:

$$\Pi = 0,2K_{\text{ун}} \sqrt{\frac{v}{w} \frac{nL_{\Pi}}{t}}, \quad (5.34)$$

где $K_{\text{ун}}$ – коэффициент предотвращенного уноса, учитывающий вторичный унос золы; v – скорость дрейфа, м/с; w – скорость газов в электрофильтре; n – количество полей в электрофильтре; $L_{\text{п}}$ – длина поля; t – расстояние между коронирующим и осадительным электродами.

5.6. Тканевые пылеуловители

В тканевых фильтрах фильтрация осуществляется через ткань, изготавливаемую из нитей диаметром 100...300 мкм. Фильтры имеют цилиндрическую форму и получили название рукавных. С помощью тканевых фильтров можно получить степень улавливания пыли выше, чем у электрофильтра. Для снижения гидравлического сопротивления скорость газового потока через ткань должна быть очень низкой: $u = 0,01...0,02$ м/с. Но и при такой скорости гидравлическое сопротивление оказывается высоким (0,5...1,5 кПа). Наибольшую трудность в эксплуатации представляет удаление осевшей на ткань золы. Для ее удаления применяется механическое встряхивание либо продувка воздухом в обратном направлении, причем на это время очищаемая секция, как правило, должна отъединяться от газового потока шиберами.

Фильтрующая ткань должна выдерживающего работу при достаточно высокой температуре уходящих газов. Материал фильтра должен быть устойчивым к повышенной влажности и влиянию химических соединений. В качестве материала фильтров нашли применение шерсть, шерстяной войлок или лавсан при температуре газов до 130 °С. До температуры 260 °С применяется стекловолокно и стекловолокно с графитом. Применяется также оксалин (до 250 °С). Длительность работы ткани составляет от 1 до 3 лет.

Устройство и принцип действия тканевого рукавного фильтра показаны на рис. 5.11. Конструкция рукавного фильтра схематично представлена на рис. 5.12.

Фильтр выполнен в многокамерном исполнении. Число рукавов в одной камере может составлять от нескольких десятков до 100 и более. Дымовые газы проходят снизу внутрь рукавов, осаждение частиц пыли происходит 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 навстречу потоку очищенных дымовых газов. Отделившаяся пыль падает в пылесборник, находящийся под рукавами, и удаляется с помощью шнеков из фильтровального помещения.

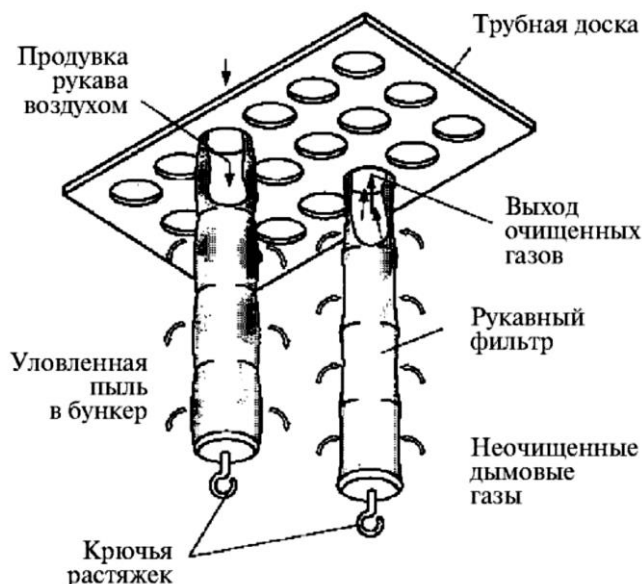


Рис. 5.11. Принцип действия тканевого рукавного фильтра

Фильтры с регенерацией встряхиванием имеют специальные колотушки, расположенные на наклонных рамах, на которых крепятся рукава. К недостаткам этого метода относится быстрый износ ткани рукава. По этой причине, особенно при использовании стеклоткани, для регенерации фильтров используют вибраторы, осуществляющие горизонтальные трясущие движения либо полоскательные движения рукавов.

Такие фильтры конструктивно выполняются многокамерными с подачей дымовых газов внутрь рукавов. Регенерация фильтра осуществляется с помощью сжатого воздуха низкого давления. Избыточное давление воздуха не превышает 10 Па. Такая регенерация является щадящей, срок эксплуатации рукавов достигает 16 тыс. ч. Рабочее время фильтрующей ткани определяется появлением дефектов в ткани либо ростом ее сопротивления за счет склеивания пор. Рукава обычно имеют следующие размеры: диаметр 316 мм, длину 10 м. Площадь фильтрации одного рукава составляет 10 м^2 .

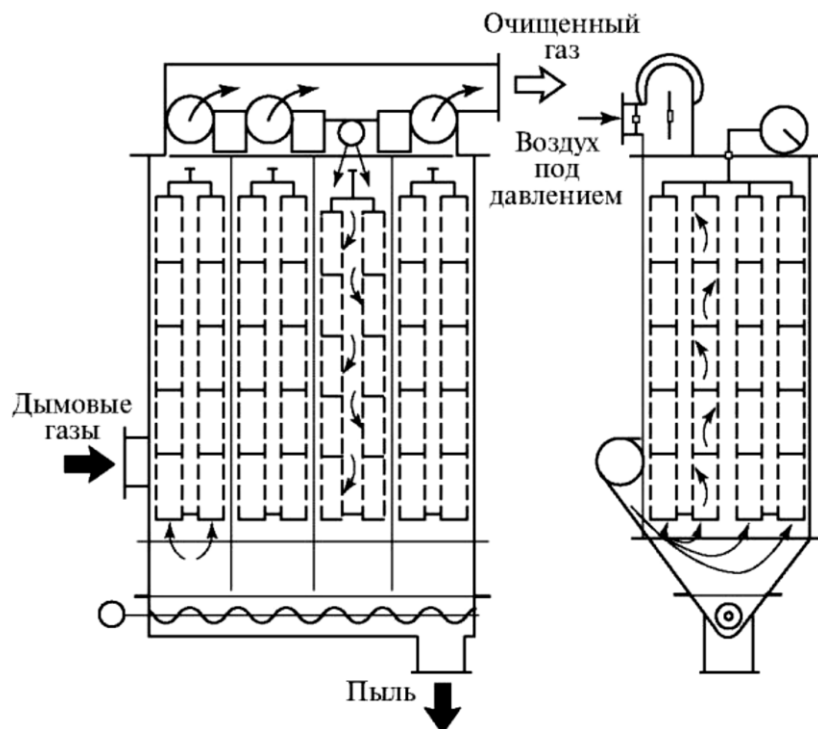


Рис. 5.12. Тканевый рукавный фильтр

Распространение получили также рукавные фильтры, где регенерация осуществляется при высоком избыточном давлении. Этого удалось достигнуть благодаря использованию в качестве фильтрующего материала игольчатого войлока, имеющего высокую прочность. 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. Происходит встряхивание и деформация рукава, который вздувается, за счет чего слой пыли стекает вниз и удаляется. Давление воздуха в резервуаре для регенерации варьируется от 0,5105 до 7105 Па.

Остаточная концентрация золы (пыли) после тканевых фильтров может составлять $15...50 \text{ мг/м}^3$ что удовлетворяет самым жестким нормативам. Расчетная нагрузка на 1 м^2 ткани не должна превышать $12...18 \text{ г/}(\text{м}^2 \cdot \text{мин})$. Температура газов на выходе фильтров должна быть на $15...30 \text{ }^\circ\text{C}$ выше температуры точки росы.

Тканевые фильтры применяются в основном при относительно небольших объемных расходах уходящих газов, например на предприятиях производства цемента, где установка тканевого фильтра оказывается выгоднее, чем сооружение высокой дымовой трубы.

Количественные значения удельных выбросов загрязняющих веществ в атмосферу для котельных установок, введенных на ТЭС с 1 января 2001 г., для твердых топлив всех видов не должны превышать нормативных, указанных в табл. 5.1 [46].

Таблица 5.1

Удельные выбросы загрязняющих веществ в атмосферу для котельных установок, введенных в эксплуатацию на ТЭС с 1 января 2001 г., для твердого топлива всех видов

Тепловая мощность котлов Q , МВт (паропроизводительность котла D , т/ч)	Приведенное содержание золы $A_{пр}$, % · кг/МДж	Массовый выброс твердых частиц на единицу тепловой энергии, г/МДж	Массовый выброс твердых частиц, кг/т у. т.	Массовая концентрация частиц в дымовых газах* при $\alpha = 1,4$, мг/м ³
До 299 (до 420)	Менее 0,6	0,06	1,76	150
	0,6...2,5	0,06...0,10	1,76...2,93	150...500
	Более 2,5	0,10	2,93	500
300 и более (420 и более)	Менее 0,6	0,02	0,59	50
	0,6...2,5	0,02...0,6	0,59...1,76	50...150
	Более 2,5	0,6	1,76	150
Примечание – * При нормальных условиях (температура 0 °С, давление 101,3 кПа)				

Контрольные вопросы

1. Какие характеристики золы являются основными?
2. Опишите кривую остатков на сите.
3. Раскройте понятие «фракционный состав золы».
4. Расскажите, как влияет электрическое сопротивление золы на ее улавливание в электрофильтре.
5. Нарисуйте принципиальную схему электрофильтра.
6. Объясните, что такое слипаемость золы, и расскажите на что она влияет.
7. Поясните, когда возможна цементация золы.
8. Расскажите, как оценивается эффективность работы золоуловителя.
9. Дайте определение понятия «скорость дрейфа».
10. Нарисуйте и объясните схему батарейного циклона.

11. Раскройте понятие «параметр золоулавливания».
12. Объясните принцип действия мокрого инерционного золоуловителя и электрофильтра.
13. Расскажите, что такое коронный разряд в электрофильтре.
14. Поясните, как изменить скорость дрейфа в электрофильтре.
15. Расскажите, что такое степень заполнения объема электрофильтра.
16. Нарисуйте схему распределительного устройства при нижнем подводе газов к электрофильтру.
17. Объясните принцип действия и конструкцию тканевого золоуловителя.

6. УМЕНЬШЕНИЕ ВЫБРОСОВ ОКСИДОВ СЕРЫ

6.1. Определение необходимой степени очистки

В настоящее время в России нет ТЭС с использованием отечественных установок серо- и азотоочистки. Идет внедрение в эксплуатацию технологии сероочистки на Троицкой ГРЭС (блок 600 МВт, мокрая известняковая технология производства, разработанная КНР) и Черепетской ГРЭС (два блока по 225 МВт каждый, NiD-технология фирмы «Альстом»).

Наибольшие допустимые значения выбросов оксидов серы в пересчете на сухой газ при температуре $t = 0$ °С, коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1,4$ и давлении $p = 760$ мм рт. ст. для котельных установок, введенных на российских ТЭС до 31 декабря 2000 г., для твердых и жидких видов топлива приведены в табл. 6.1 [46].

Для котельных установок на твердых и жидких видах топлива, введенных на российских ТЭС с 1 января 2001 г., допустимые значения выбросов оксидов серы также приведены в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Удельные выбросы в атмосферу оксидов серы для котельных установок

Паропроизводительность котла, т/ч	Приведенное содержание серы в топливе $S_{пр}$, % · кг/МДж	Массовая концентрация SO_x в дымовых газах ($\alpha = 1,4$), мг/м ³
Котельные установки для твердых и жидких видов топлива, введенные в эксплуатацию до 31 декабря 2000 г.		
До 420	0,045 и менее	2 000
	более 0,045	3 400
420 и более	0,045 и менее	2 000
	более 0,045	3 000
Котельные установки для твердых и жидких видов топлива, введенные в эксплуатацию с 1 января 2001 г.		
до 320	0,045 и менее	1200
	более 0,045	1400
320...400	0,045 и менее	950
	более 0,045	1050
400 и более	—	700

В странах ЕС предельные величины выбросов SO_x для жидкого топлива не должны превышать указанных на рис. 6.1 [47]. Рис. 6.1 приведен в оригинальном изображении, т. е. для избытка воздуха 3 % ($\alpha = 1,17$). Здесь по оси абсцисс отложены тепловые мегаватты (МВт).

Тепловые 50 МВт соответствуют, приблизительно, производительности котла 70 т/ч, 300 МВт – 420 т/ч, 500 МВт – 700 т/ч. В ходе сравнения с нормативами российских ТЭС после пересчета на $\alpha = 1,4$ массовая концентрация SO_x вместо 1 600 мг/м³ составит 1 333 мг/м³, а вместо 400 мг/м³ – 333 мг/м³.

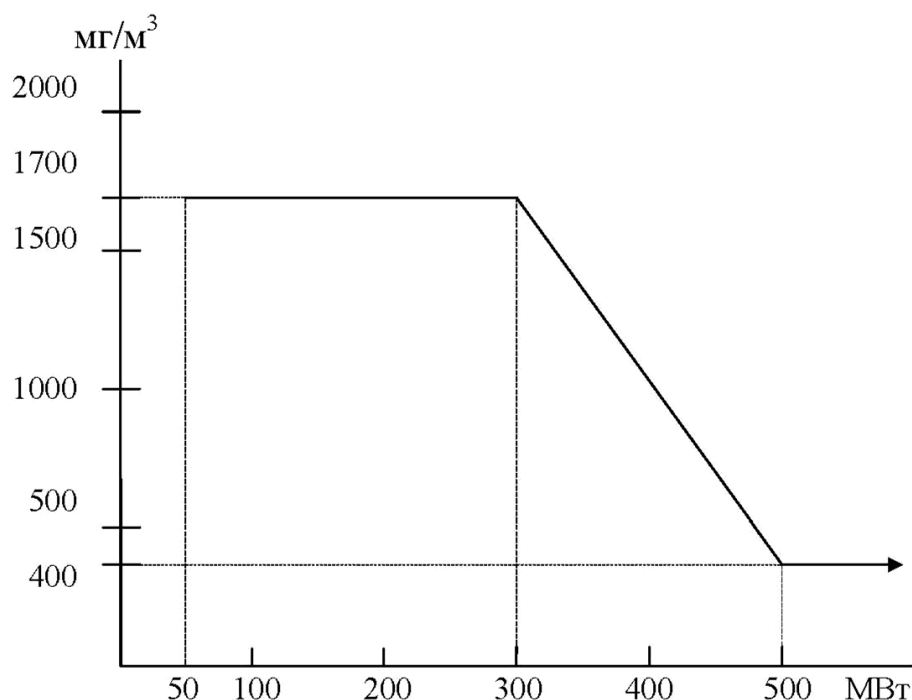


Рис. 6.1. Зависимость концентрации SO_2 от тепловой мощности установки для жидкого топлива при содержании кислорода в продуктах сгорания 3%

Исходя из вышесказанного, можно сделать следующие выводы: в странах ЕС установлены более жесткие, чем в РФ, нормативы для крупных котлов для жидкого топлива.

Также в странах ЕС установлены наибольшие допустимые значения выбросов оксидов серы и для газообразного топлива (табл. 6.2).

Таблица 6.2

Наибольшие допустимые значения выбросов оксидов серы
для газообразного топлива в странах ЕС

Тип топлива	Предельная величина, мг/м ³
Обычный газ (природный)	30
Сжиженный газ	4
Низкокалорийный газ от установок газификации и нефтепереработки, коксовый газ, доменный газ	670

Массовая концентрация при нормальных условиях, которая будет создаваться в продуктах сгорания, зависит от сернистости топлива, объема продуктов сгорания одного килограмма топлива и избытка воздуха в продуктах сгорания. Так, например, из [27] имеем табл. 6.3, где в 1-м столбце в скобках указан номер топлива: из табл. I [27] – для твердых топлив, для мазута – по табл. III [27] и для газа – из табл. IV [27]. Столбцы со 2-го по 4-й также заполнены по данным этих таблиц. Теоретический объем сухих продуктов сгорания при нормальных условиях (5-й столбец) заполнен по данным табл. XII [27].

Концентрацию SO_2 при $\alpha = 1,4$ (пересечение столбца 6 и строки 1) рассчитаем следующим образом: сначала найдем количество серы в 1 кг угля M_S :

$$M_S = \frac{S^r \cdot 1000}{100} = \frac{3,4 \cdot 1000}{100} = 34 \text{ г/кг.} \quad (6.1)$$

Затем определим количество сернистого ангидрида M_{SO_2} из реакции горения серы $S + O_2 = SO_2$. Образование серного ангидрида пренебрегаем. В результате SO_2 получается в два раза больше, чем серы:

$$M_{SO_2} = 2 \cdot M_S = 2 \cdot 34 = 68 \text{ г/кг.} \quad (6.2)$$

Из табл. 6.3 видно, что при сгорании 1 кг этого угля образуется $V_{\Gamma}^0 = 4,98 \text{ м}^3/\text{кг}$ продуктов сгорания при теоретически необходимом количестве воздуха. Тогда при $\alpha = 1$ концентрация SO_2 составит:

$$C_{SO_2} = \frac{1000 \cdot M_{SO_2}}{V_{\Gamma}^0} = \frac{1000 \cdot 68}{4,98} = 13\,655 \text{ мг/м}^3. \quad (6.3)$$

Таблица 6.3

Таблица расчетных параметров

№ п/п	Бассейн, месторождение	Марка, класс	S^p , %	V_{Γ}^0 , м ³ /кг	$C_{SO_2}^{\alpha=1,4}$ мг/м ³	η'_{SO_2}	η_{SO_2} , %
1	2	3	4	5	6	7	8
1 (2)	Донецкий	Д, отсеv	3,4	4,98	9754	0,1	92,0
2 (30)	Кузнецкий	Г, промпродукт	0,6	5,35	1602	0,1	51,4
3 (48)	Карагандинский	Р, отсеv	0,7	4,78	2092	0,1	62,8

Окончание табл. 6.3

1	2	3	4	5	6	7	8
4 (54)	Экибастузский	СС, Р	0,7	4,56	2193	0,02	67,4
5 (61)	Подмосковный	2Б, Р	2,5	2,47	14459	0,1	94,6
6 (63)	Печерский	Д, отсев	2,5	4,50	7936	0,1	90,2
7 (68)	Кизеловский	Г, промпродукт	7,2	5,29	19443	0,1	96,0
8 (88)	*Назаровское	2Б, Р	0,4	4,34	1317	0,2	33,6
9 (89)	*Березовское	2Б, Р	0,2	5,03	821	0,5	–
9 (138)	Южно-Сахалинский	3Б, Р	0,5	3,97	1799	0,1	56,8
10 (143)	Ленинград-сланец	Сланец	1,3	2,39	7770	0,8	55,0
11 (1)	Мазут-100	Низкосернистый	0,39	11,76	474	0,02	–
12 (4)	Мазут-100	Высокосернистый	2,55	11,22	3247	0,02	78,0
13 (13)	Попутный газ	Ярино-Пермь	1,1**	13,90	1634	0	57,2
Примечание: * – Канско-Ачинский бассейн; ** – объемная доля сероводорода (H ₂ S).							

Концентрацию SO₂ пересчитаем на стандартный избыток воздуха 1,4:

$$C_{\text{SO}_2}^{\alpha=1,4} = C_{\text{SO}_2} / 1,4 = 9\,754 \text{ мг/м}^3. \quad (6.4)$$

Подставляя последовательно (6.1)–(6.3) в (6.4), получим в общем виде:

$$C_{\text{SO}_2}^{\alpha=1,4} = \frac{14\,285 \cdot S^r}{V_{\text{r}}^0}, \quad (6.5)$$

где S^r – сернистость топлива, %.

По формуле (6.5) рассчитывается концентрация всех твердых топлив в столбце 6 табл. 6.4.

Немного по-другому рассчитывается эта величина для попутного газа. Здесь присутствие серы отмечается в виде сероводорода H₂S в процентах по объему. Объемная доля H₂S (строка 13 табл. 6.3) составляет 1,1 % или 0,011 м³/м³. Плотность сероводорода составляет $\rho_{\text{H}_2\text{S}} = 1,539 \text{ кг/м}^3$. Это означает, что в 1 м³ газообразного топлива содержится $0,011 \cdot 1,539 = 0,0169 \text{ кгH}_2\text{S}$.

Реакция горения сероводорода:



Из реакции видно, что при сгорании 1 кг H_2S образуется 1,882 кг SO_2 . При сгорании 1 м³ газообразного топлива образуется 13,9 м³ продуктов сгорания при $\alpha = 1$ и при нормальных условиях. В результате получим формулу для расчета концентрации (H_2S в %):

$$C_{\text{SO}_2}^{\alpha=1,4} = \frac{20\,653 \cdot \text{H}_2\text{S}}{V_{\text{r}}^0}. \quad (6.7)$$

Часть оксидов серы может поглощаться золой топлива [24]. Эта величина учтена в столбце $7\eta'_{\text{SO}_2}$. Здесь приведены данные для котлов с сухим шлакоудалением. При жидком шлакоудалении эти значения в 3–4 раза меньше.

Чтобы обеспечить заданный норматив $C_{\text{SO}_2}^{\text{н}}$, нужно получить степень очистки дымовых газов от оксидов серы η_{SO_2} , равную

$$\eta_{\text{SO}_2} = 100 \cdot \left(1 - \frac{C_{\text{SO}_2}^{\text{н}}}{C_{\text{SO}_2}^{\alpha=1,4} (1 - \eta'_{\text{SO}_2})} \right). \quad (6.8)$$

После подстановки в формулу (6.8) вместо $C_{\text{SO}_2}^{\text{н}}$ ее числового значения ($C_{\text{SO}_2}^{\text{н}} = 700 \text{ мг/м}^3$), рассчитаем и заполним столбец 8. Как видно из табл. 6.4, без очистки от оксидов серы могут быть обеспечены требуемые концентрации только при сжигании низкосернистого мазута и Березовского угля Канско-Ачинского бассейна. При этом максимально допустимая сернистость мазута составляет 0,57 %. Если сжигается мазут с сернистостью 2,5 %, то для обеспечения непревышения допустимой концентрации оксидов серы в продуктах сгорания он должен сжигаться одновременно с природным газом в соотношении не более 22 % по тепловыделению.

Это же условие будет выполняться, если сжигать смесь Березовского и Назаровского углей в соотношении 24 к 76 % соответственно.

6.2. Мероприятия, которые могут быть внедрены на действующих котлах

6.2.1. Добавка известняка в уголь перед размолом

Добавка известняка в уголь позволяет увеличить щелочность золы и тем самым повысить поглощение золой оксидов серы. Если взять за образец Березовский уголь, зола которого обеспечивает 50 %-ное поглощение сернистого ангидрида, то его зольность составит $A^P = 4,7\%$, сернистость $S^P = 0,2\%$, содержание в золе свободной окиси кальция $CaO = 42\%$.

Такое высокое содержание CaO свидетельствует о том, что зола для этого топлива это на 75 % известняк $CaCO_3$, у которого при термическом разложении в CaO переходит 56 % массы.

В реакциях связывания оксидов серы участвует CaO . Весь кальций, который находится в исходном топливе, составляет часть зольности этого топлива. Учтем также то, что количество щелочных компонент для эффективного обессеривания дымовых газов должно быть пропорционально сернистости топлива. Тогда можно в первом приближении принять, что для обеспечения 50 % связывания оксидов серы при сжигании угля нужно обеспечить щелочной комплекс равный $A^P \cdot CaO / S^P = 0,047 \cdot 0,42 / 0,002 = 9,87$, подсчитанный по характеристикам Березовского угля. Для других топлив этот комплекс подсчитан в столбце 6 табл. 6.4.

Так, например, если сжигается кузнецкий уголь, у которого зольность $A^P = 28,7\%$, сернистость $S^P = 0,6\%$, содержание в золе свободной окиси кальция $CaO = 5,8\%$, комплекс $A^P \cdot CaO / S^P = 2,774$. Повысить щелочной комплекс можно путем добавки в топливо известняка $CaCO_3$. Реакция диссоциации известняка в топке $CaCO_3 = CaO + CO_2$ показывает, что для получения 1 кг CaO необходимо 1,786 кг $CaCO_3$. Исходя из этого, можно составить уравнение:

$$\frac{(0,287 \cdot 0,058 + x \cdot 0,56)}{0,287 \cdot 0,058} = \frac{9,87}{2,774}, \quad (6.9)$$

где $0,56 = 1/1,786$; x – необходимая доля известняка.

Решая уравнение, получаем $x = 0,0737$.

Таблица 6.4

Результаты расчетов щелочного комплекса

№ п/п	Бассейн, месторождение	Марка, класс	А _Р , %	СаО, %	$\frac{A_P \cdot CaO}{S_P}$
1	2	3	4	5	6
1 (2)	Донецкий	Д, отсев	27,8	2,0	0,164
2 (30)	Кузнецкий	Г, промпродукт	28,7	5,8	2,774
3 (48)	Карагандинский	Р, отсев	34,6	3,1	1,532
4 (54)	Экибастузский	СС, Р	36,9	1,1	0,580
5 (61)	Подмосковный	2Б, Р	30,6	4,1	0,502
6 (63)	Печерский	Д, отсев	28,8	6,9	0,795
7 (68)	Кизеловский	Г, промпродукт	32,0	3,7	0,164
8 (88)	*Назаровское	2Б, Р	7,9	35,0	6,912
9 (89)	*Березовское	2Б, Р	4,7	42,0	9,870
9 (138)	Южно-Сахалинский	3Б, Р	25,6	5,0	2,560
10 (143)	Ленинград-сланец	Сланец	48,2	50,4	18,69

Таким образом, для создания условий связывания оксидов серы золой, близких к условиям Березовского угля, нужно в кузнецкий уголь добавлять еще известняк в количестве 7,37 % от расхода топлива. В результате зольность топлива увеличивается до 36,1 %, т. е. на 26 %. Более чем на 7 % снизится теплотворная способность топлива.

Это дополнительная нагрузка на станцию. Существенно увеличивается расход электроэнергии на подготовку топлива. Может потребоваться установка более мощных двигателей для привода дробилок и мельниц.

Для некоторых углей это также может сказаться на шлаковании топки. Увеличивается нагрузка на золоуловители и на систему золоудаления. За счет повышения сопротивления газового тракта увеличится и расход электроэнергии на дымососы.

В качестве некоторой компенсации можно ожидать увеличения излучательной способности газов в топке за счет увеличения доли трехатомных газов, что приведет к некоторому уменьшению температуры газов на выходе из топки. Также снижается вероятность низкотемпературной коррозии в элементах котла, что позволяет уменьшить температуру уходящих газов и повысить КПД котла.

Провести необходимую реконструкцию станции возможно с использованием отечественного оборудования.

6.2.2. Уменьшение выбросов оксидов серы при сжигании мазута

Отсутствие золоуловителей на котлах, сжигающих мазут, до настоящего времени рассматривалось как непреодолимое препятствие для ввода твердых щелочных компонентов в топку котла. Однако, учитывая тот факт, что оксиды серы и твердые частицы не обладают свойством суммации вредного воздействия, можно рассчитать допустимый выброс твердых частиц при отсутствии золоуловителя.

Рассмотрим это предложение на примере. Пусть на дымовую трубу высотой 250 м с диаметром устья 6 м подключены 4 котла ТГМ-84Б, паропроизводительностью $D = 420$ т/ч и сжигающих каждый по $B = 33$ т/ч мазута сернистостью $S^P = 2,55$ %. Такой мазут относится к высокосернистым (табл. 6.4). Принимая температуру уходящих газов $t_{yx} = 130$ °С и коэффициент избытка воздуха в дымовой трубе $\alpha = 1,1$, и учитывая, что $V_{\Gamma}^0 = 11,22$ нм³/кг, а теоретически необходимый объем воздуха для сгорания одного килограмма мазута $V_B^0 = 10,44$ нм³/кг, найдем расход дымовых газов от одного котла в устье дымовой трубы $V_1 = 166$ м³/с и для трубы $V = 664$ м³/с. При такой сернистости мазута каждый котел выбрасывает $M_{SO_2} = 468$ г/с сернистого ангидрида.

Найдем возможный выброс твердых веществ M для допускаемой концентрации $C_{доп} = 0,5$ мг/м³ при температуре наружного воздуха газов $t_B = 20$ °С:

$$M = \frac{C_{доп} H^2 \sqrt[3]{V \Delta t}}{A F m n}, \quad (6.10)$$

где $\Delta t = 130 - 20 = 110$ °С; коэффициент температурной стратификации $A = 160$; коэффициент осаждения примеси $F = 3$.

Коэффициент m найдем по формуле [32]:

$$m = \frac{1}{0,67 + 0,1\sqrt{f} + 0,34\sqrt[3]{f}}. \quad (6.11)$$

Коэффициент f в (6.11) найдем по формуле:

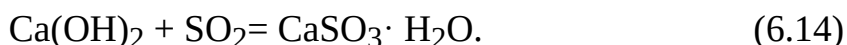
$$f = 1000 \frac{w_0^2 D}{H^2 \Delta t}. \quad (6.12)$$

Подставив принятые численные значения, получаем $f = 0,993$, находим комплекс v_M :

$$v_M = 0,653 \sqrt{\frac{V \Delta t}{H}}. \quad (6.13)$$

Подставив принятые численные значения, получаем $v_M = 4,31$. При $v_M > 2n = 1$ [32]. Подставив принятые численные значения, получаем $M = 2746 \text{ г/с}$ или для одного котла $M_1 = 686 \text{ г/с}$.

Наиболее эффективным способом ввода щелочной присадки в топку является ввод гашеной извести в виде третьего компонента в составе водомазутной эмульсии. Реакция с оксидами серы может быть записана как



Полуводный гипс в топке переходит в безводный гипс CaSO_4 . На основании реакции (6.14) видим, что при расходе $\text{CaSO}_4 = 686 \text{ г/с}$ может поглощаться 322 г/с SO_2 , что составляет $322/468 = 0,668$ или $66,8 \%$ от всех образовавшихся оксидов серы. Это еще не полное решение для выполнения норматива по выбросу оксидов серы (для рассмотренного примера нужен КПД 78%), но уже значительное приближение к нему.

Учитывая малые размеры и массу частиц гашеной извести после кавитатора, можно ожидать, что и частицы безводного гипса будут иметь примерно такие же размеры, что обеспечит отсутствие их заметной сепарации в топке и газоходах.

Таким образом, предлагается решение наиболее острой проблемы уменьшения выбросов оксидов серы при сжигании мазута в случае отсутствии сероулавливающего оборудования.

6.2.3. Подача известняковой пыли в топку

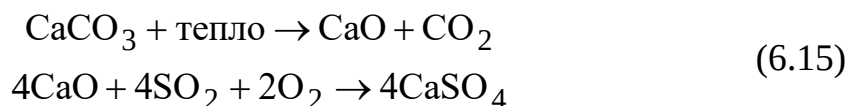
Система уменьшения выбросов оксидов серы с помощью подачи известняковой пыли в топку во многом схожа с подачей извести в топливо перед его размолем. Отличие заключается в том, что сооружается отдельная система размола и вдувания известняка в топку. Это позволяет не затрагивать существующую систему пылеприготовления.

Известняковая пыль подается в верхнюю треть топки, что позволяет сжигать топливо в обычном режиме. Практически не изменятся и условия по шлакованию топки и условия излучения тепла от топочных газов к экранам.

Расход кузнецкого угля для котла производительностью $D = 420$ т/ч составляет примерно 50 т/ч. Расход известняка в рассмотренном выше примере составит примерно 5 т/ч. Для транспортировки известняка можно применить систему подачи пыли высокой концентрации. В этом случае для транспортировки пыли достаточно будет одного трубопровода диаметром около 10 см.

Недостатком этого метода является то, что в топке нужно соорудить систему для равномерного распределения известняковой пыли по сечению топки. Эти устройства должны будут находиться в зоне температур 1000–1200°C и потребуются специальные меры по их охлаждению. Кроме того, за счет использования меньшего объема топки эффективность этого метода будет меньше рассмотренного выше и составит не более 35 %. Так что для обеспечения нормы по SO_2 нужно будет применять еще дополнительные меры.

Реакции удаления SO_2 при вдувании размолотого известняка в топку следующие:

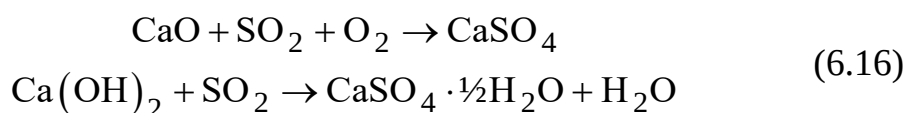


Реакции идут при температурах газов в интервале 980–1230°C и около 540°C [10]. В результате реакции образуется безводный гипс. Его температура плавления 1450°C, поэтому он практически не участвует в шлаковании ширм, но увеличивает занос конвективных поверхностей нагрева. В воде он растворим незначительно, но при наличии мокрых золоуловителей может приводить к образованию трудно удаляемых отложений.

6.2.4. Подача известковой пыли в газоходы

В качестве дополнительной меры для повышения степени очистки продуктов сгорания от оксидов серы можно вводить известковую пыль (негашеную или гашеную известь) в газоходы перед золоуловителями. В связи с низкими температурами газов известняковую пыль здесь использовать уже нельзя.

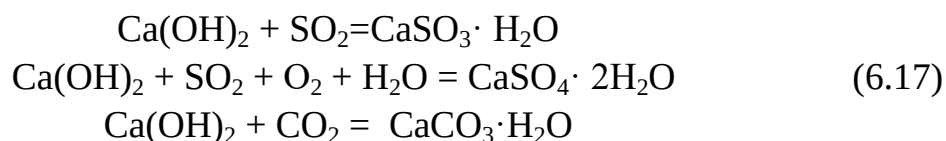
Если этот способ используется как основной, т. е. без подачи пыли известняка в топку, то известковая пыль вводится при температурах газов порядка 800–900 °C, т. е. в поворотной камере перед конвективными поверхностями нагрева. При этом идут следующие реакции с получением безводного или полуводного гипса:



Практически удобнее бывает вводить реагент в виде тонко диспергированной известковой суспензии. Если на котле установлены сухие золоуловители, то количество воды в суспензии зависит от температуры дымовых газов таким образом, чтобы вся эта вода успевала испариться до контакта с металлическими поверхностями. Суспензия вводится через систему форсунок тонкодисперстного разбрызгивания с помощью перегретого пара или сжатого воздуха. При приготовлении суспензии используется как негашеная CaO , так и гашеная известь $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Этот способ можно использовать и для впрыска известковой суспензии в газоходы за котлом, до золоуловителей. Такой способ очистки носит название мокросухого [48]. Он существенно проще, но и эффективность его ниже.

Основными химическими реакциями при этом являются:



Сухие отходы улавливаются вместе с золой в золоуловителе. Если в качестве золоуловителя используется электрофильтр, то при высокоомной золе его КПД увеличивается как за счет возрастания скорости дрейфа золы за счет ее увлажнения, так и за счет уменьшения удельного объема газов при их охлаждении водой, что приводит к увеличению времени пребывания газов в электрофильтре.

6.2.5. Подача раствора соды в скруббер Вентури

При наличии на станции мокрой системы золоулавливания с трубой Вентури для одновременного с улавливанием золы поглощения оксидов серы возможна подача раствора соды в сопла скруббера Вентури. Высокая реакционная способность соды и интенсивное перемешивание раствора с дымовыми газами в диффузорах труб Вентури позволяют обеспечить 50 % очистку газов на ограниченном расстоянии. Высокие скорости газов в трубах Вентури предотвращают образование трудноудаляемых отложений. В качестве реагента может использоваться как каустическая

NaOH, так и кальцинированная сода Na_2CO_3 . Получающийся сульфит натрия с помощью суспензии гашеной извести и продувки воздухом переводится в труднорастворимый двухводный гипс. Схема установки приведена на рис. 6.1.

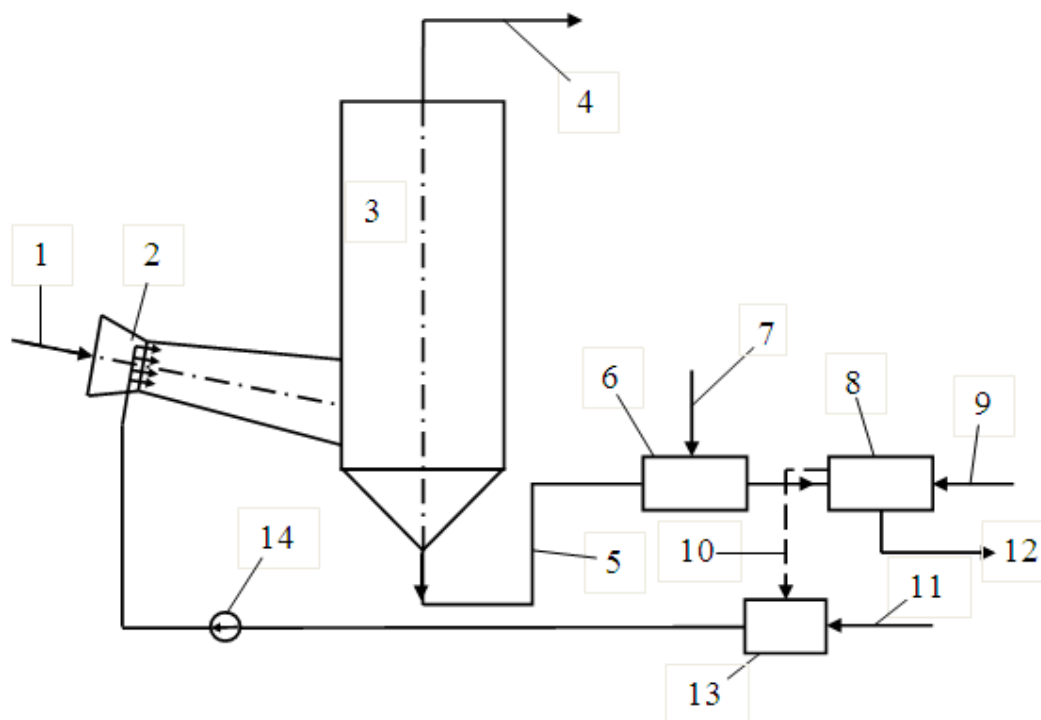
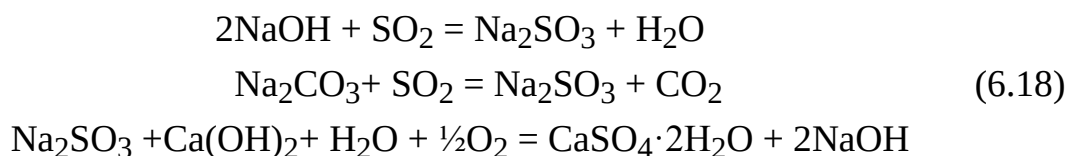


Рис. 6.1. Сероочистка со скрубберами Вентури: 1 – вход дымовых газов; 2 – труба Вентури; 3 – скруббер Вентури; 4 – выход очищенных газов; 5 – водозоловая пульпа; 6 – конвертер; 7 – подача извести; 8 – отделитель твердой фазы; 9 – подача воздуха; 10 – отвод жидкой фазы; 11 – подача соды; 12 – отвод твердой фазы на золоотвал; 13 – резервуар подготовки реагента; 14 – насос подачи реагента

Основными реакциями при данной технологии являются:



Если принять стоимость известняка за единицу, то стоимость извести примерно в 10 раз выше, а соды еще в два раза больше стоимости извести. В связи с тем, что в такой схеме применяется дорогой реагент, в схему введены элементы, обеспечивающие условия его наиболее полного использования. Выбор той или иной схемы уменьшения выбросов оксидов серы требует тщательного технико-экономического анализа. Однако для обеспечения принятых на себя обязательств при сжигании большинства

углей и сернистого мазута эти способы или недостаточны, или неприемлемы (при сжигании мазута на Российских котлах отсутствуют золоуловители). Поэтому при вводе новых котлов придется закупать импортное газоочистное оборудование.

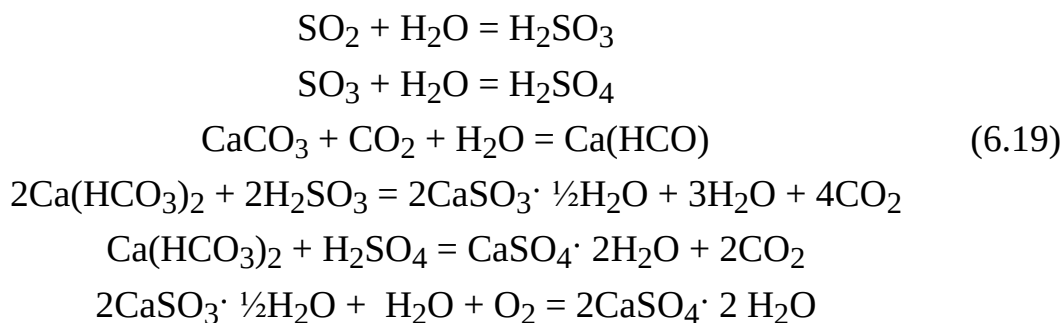
6.3. Сероочистка уходящих газов в мировой практике

6.3.1. Мокрая известняковая технология

Сероочистка дымовых газов в зарубежных технически развитых странах мира, в отличие от России, развита широко. Подавляющее большинство котлов, сжигающих мазут или твердое топливо оборудованы системами сероочистки. В большинстве случаев (примерно 80 %) применяются мокрые скрубберы с использованием известняка. Это обусловлено их высокой эффективностью по удалению SO_2 и высокой надежностью. Немалую роль играет и то, что известняк доступен в больших количествах и он дешевле, чем прочие сорбенты. Побочными продуктами являются либо гипс, либо сульфит/сульфат кальция, в зависимости от режима окисления. Если гипс продается, то эксплуатационные расходы снижаются. Все новые котлы, топливо которых содержит серу, оборудуются устройствами сероочистки уходящих дымовых газов.

Суть такого процесса заключается в организации прохождения дымовых газов через объем, густо заполненный как можно более мелкими каплями водо-известняковой суспензии. Эта технология основана на связывании диоксида и триоксида серы с образованием сульфита кальция, который доокисляется до двухводного сульфата (гипса).

При этом имеют место следующие реакции:



Принципиальная схема мокрой известняковой очистки показана на рис. 6.2.

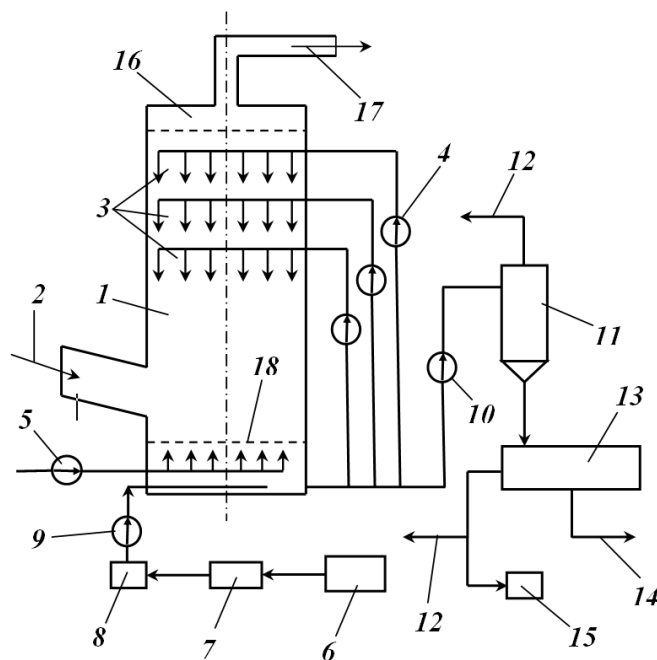


Рис. 6.2. Принципиальная схема мокрой известняковой очистки: 1 – абсорбер; 2 – вход дымовых газов; 3 – оросительное устройство; 4 – насосы циркуляции известняковой суспензии; 5 – вентилятор подачи воздуха; 6 – склад известняка; 7 – дробилки и мельницы для известняка; 8 – узел приготовления суспензии; 9 – насос подачи суспензии; 10 – насос отвода части суспензии из цикла; 11 – разделитель твердой и жидкой фаз; 12 – возврат жидкой фазы в абсорбер; 13 – узел обезвоживания гипса; 14 – выход готового гипса; 15 – очистка сточной воды; 16 – сепарационное устройство; 17 – выход очищенных газов; 18 – верхний уровень известняковой суспензии

Основная часть оксидов серы при сгорании топлива получается в виде сернистого ангидрида SO_2 (95–96%), остальная часть – в виде серного ангидрида SO_3 . Сернистый ангидрид хорошо растворим в воде (жадно поглощается) с образованием серной кислоты H_2SO_4 , а сернистый растворяется значительно хуже с образованием неустойчивой сернистой кислоты H_2SO_3 . Образующийся гидрокарбонат кальция $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ реагирует с сернистой и серной кислотой с образованием двухводного $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ или полуводного $\text{CaSO}_3 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$ гипса. Полуводный гипс с помощью продувки воздухом доокисляется до двухводного гипса.

Установка работает следующим образом: дымовые газы после золоуловителя попадают в абсорбер. Сюда же насосом 9 подается известняковая суспензия – смесь известняковой пыли тониной помола известняка 75–150 мкм с водой при концентрации не более 15 % во избежание засорения абсорберов. Известняк также частично растворяется в воде. Нижняя часть абсорбера заполнена известняковой суспензией. В верхней части абсорбера находится состоящее из нескольких

ярусов оросительное устройство, основными элементами которого являются разбрызгивающие форсунки и подающие к ним суспензию трубопроводы.

В связи с малой растворимостью известняка в воде, применяется высокая интенсивность орошения, достигающая до 22 л/м^3 , а суспензия с помощью насосов 4 циркулирует в абсорбере многократно. Для доокисления сульфита кальция в двухводный гипс вентилятором 5 подается воздух. В верхней части абсорбера находится сепарационное устройство, предотвращающее унос крупных капель с дымовыми газами.

Насосом 10 обеспечивается непрерывная продувка абсорбера, позволяющая обеспечить допустимое содержание карбоната кальция в воде и уменьшение скорости образования отложений в корпусе абсорбера. Продувочная суспензия поступает в разделитель твердой и жидкой фаз 11, например в гидроциклоны. Жидкая фаза возвращается в абсорбер, а твердая подается в узел обезвоживания гипса 13. Обезвоживание гипса происходит в вакуумных фильтрах. В зависимости от режима работы установки фильтрат также может возвращаться в абсорбер (линия 12) или через очистное устройство 15 сбрасываться в окружающую среду. Обезвоженный гипс подается (выход 14) на склад готовой продукции.

Данный способ может обеспечить очистку дымовых газов от оксидов серы с эффективностью до 95 %. Преимуществом данного способа перед большинством других является его экологическая безопасность, так как реагент и отходы нейтральны и плохо растворимы в воде.

Одним из положительных факторов данного способа является практически полное удаление SO_3 , что снижает вероятность низкотемпературной коррозии следующих по ходу элементов газовой воздушного тракта и допускает некоторое снижение температуры уходящих дымовых газов, что повышает КПД котла.

Наибольшие трудности возникают из-за необходимости периодической остановки сероулавливающей установки для очистки аппаратуры от кристаллических отложений CaSO_3 и брызгоуловителей от отложений, содержащихся в каплях взвешенных веществ.

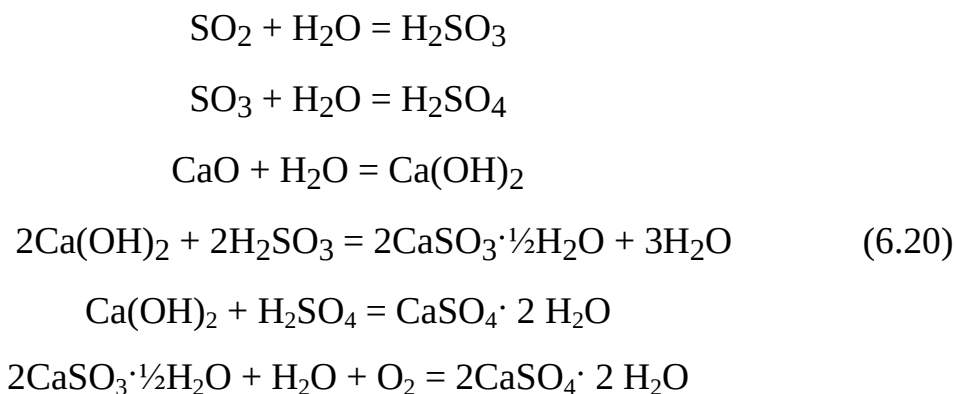
Основываясь на опыте США, необходимыми условиями этого способа является практически удвоение площади, занимаемой энергоблоком, увеличение его стоимости на 20–25 % и удорожание производства электроэнергии примерно на 10–15 %. И это при налаженном и отработанном производстве систем сероочисток в своей стране. Применительно к России все выглядит более сложным: или

дополнительные расходы на разработку, освоение и собственное производство данного вида оборудования, или коммерческие наценки на его закупку за рубежом, в том числе с возможностью неожиданного применения санкций и прекращения поставок запасных частей.

6.3.2. Мокрая известковая технология

В некоторых случаях экономически более выгодным оказывается применение вместо известняка извести. Процесс сероочистки с помощью извести во многом сходен с сероочисткой с помощью известняка. Эта технология также основана на связывании диоксида и триоксида серы с образованием сульфита кальция, который доокисляется до двухводного сульфата (гипса). В качестве реагента может использоваться негашеная CaO или гашеная Ca(OH)₂ известь. Если используется негашеная известь, то она предварительно гасится водой.

При этом имеют место следующие реакции:



Принципиальная схема мокрой известковой очистки такая же, как на рис. 6.2 за исключением того, что 6 – не склад известняка, а емкость для хранения извести; 7 – не дробилки и мельницы для известняка, а установки гашения извести. И готовится здесь не известняковая, а известковая суспензия (известковое молоко). Гидроксид кальция имеет более высокую растворимость в воде, чем известняк, и химически более активен. Поэтому и габариты абсорбера примерно в два раза меньше. Меньшие габариты имеет и остальное оборудование. Стоит такая установка тоже примерно в два раза меньше, чем известняковая. Но эксплуатационные затраты оказываются примерно в два раза выше. Площадь, необходимая для размещения оборудования, примерно на 20–25 % меньше, чем при известняковой сероочистке.

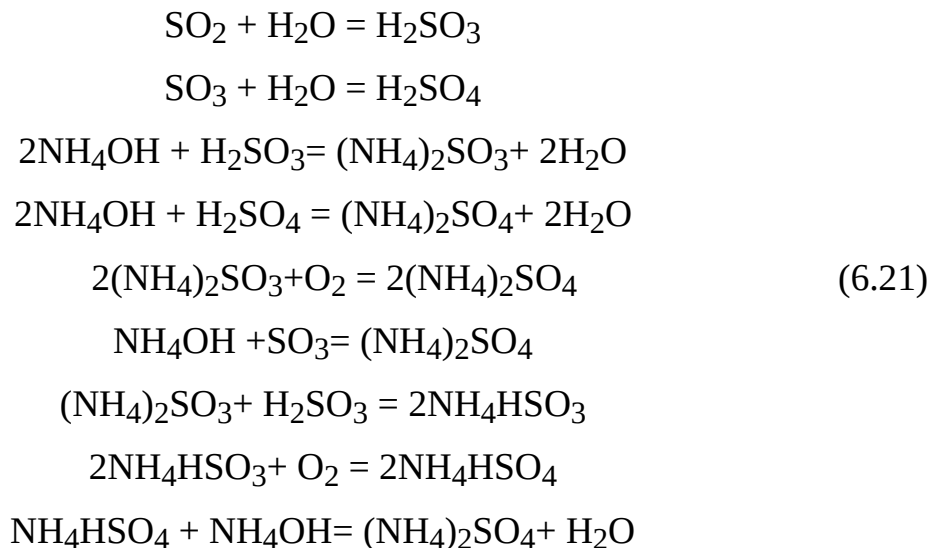
Проскок оксидов серы при известковой сероочистке примерно на 20 % меньше, чем при известняковой, а ее эффективность достигает 96 %.

Такая сероочистка оказывается более выгодной на небольших ТЭС или работающих в пиковых или полупиковых режимах. Однако работа с известью требует соблюдение специальных правил промышленной безопасности и техники безопасности.

По распространенности известковая сероочистка стоит на втором месте после известняковой.

6.3.3. Аммиачно-сульфатная технология

В том случае если поставщик реагента находится рядом с ТЭС и имеется покупатель готового продукта, наиболее выгодной может оказаться аммиачно-сульфатная технология. Эта технология основана на связывании диоксида и триоксида серы водным раствором аммиака NH_4OH с последующим окислением образовавшихся продуктов реакций до стабильного сульфата аммония $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$. Основными химическими реакциями являются:



Сульфат аммония получается четырьмя путями. Первый – взаимодействием раствора аммиака с серной кислотой, второй – доокислением сульфита аммония кислородом воздуха, третий – при реакции водного раствора аммиака непосредственно с активным серным ангидридом, четвертый – при реакции раствора аммиака с гидросульфатом аммония NH_4HSO_4 .

Принципиальная схема установки показана на рис. 6.3.

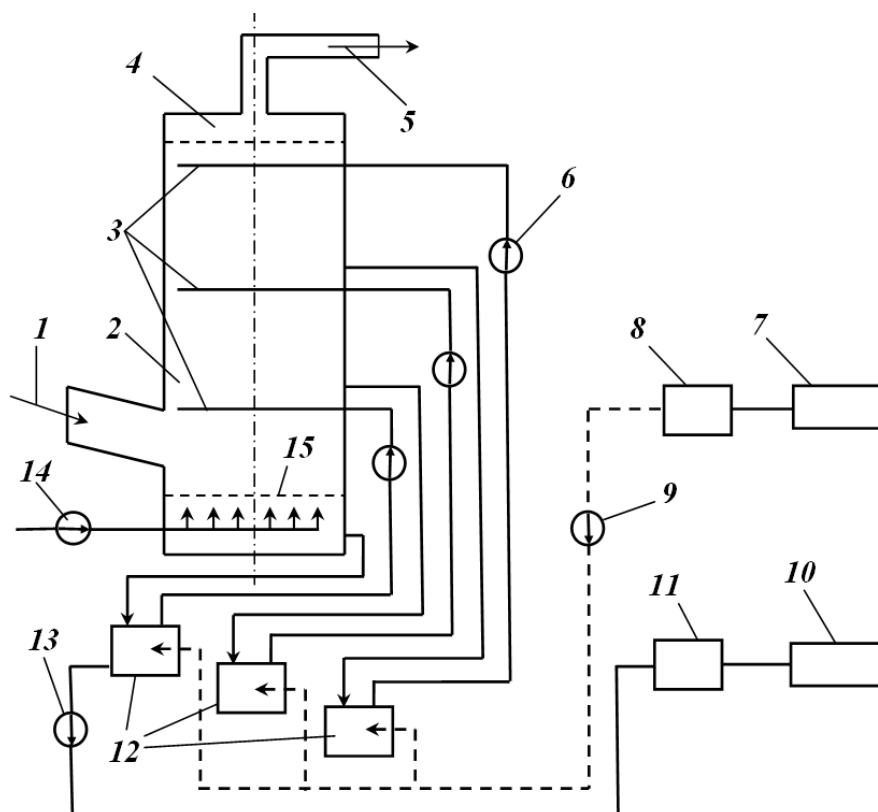


Рис. 6.3. Принципиальная схема аммиачно-сульфатной сероочистки: 1 – вход дымовых газов; 2 – абсорбер; 3 – оросительное устройство; 4 – сепарационное устройство; 5 – выход очищенных газов; 6 – насосы подачи поглотительного раствора; 7 – хранилище жидкого аммиака; 8 – узел приготовления поглотительного раствора; 9 – насос подачи поглотительного раствора; 10 – склад готовой продукции; 11 – узел получения сухого отхода; 12 – сборные емкости контуров орошения; 13 – насос откачки насыщенного раствора; 14 – вентилятор для подачи воздуха; 15 – верхний уровень поглотительного раствора

Установка работает следующим образом: дымовые газы после золоуловителя попадают в абсорбер. Все пространство абсорбера разделено на три контура, каждый из которых имеет свою сборную емкость. В эти емкости подается водный раствор аммиака и происходит возврат из контура продуктов его реакции с дымовыми газами. Из каждой емкости поглотительный раствор подается на орошение в свой контур. Концентрация сульфата аммония увеличивается от верхнего контура к нижнему. В нижнем контуре за счет продувки воздухом происходит доокисление сульфита-бисульфита аммония до сульфата аммония, в результате чего его концентрация резко увеличивается. Из этого контура осуществляется отвод раствора сульфата аммония в узел получения сухого остатка и на склад готовой продукции.

Получаемый сульфат аммония является высококачественным удобрением, что обеспечивается наличием микроэлементов, содержащихся в золе топлива. По договоренности с потребителем часть сульфата

аммония можно отгружать в жидком виде, что удешевляет его производство и использование. Недостатком такой технологии является ее высокая стоимость сооружения и эксплуатации.

Работа с аммиаком, который представляет собой ядовитый газ, требует специальных мер. Он легче воздуха, имеет специфический резкий запах, хорошо растворим в воде, образуя гидрат аммиака (NH_4OH) нашатырный спирт. Этот раствор нестойкий, NH_3 постоянно испаряется, особенно при повышении температуры, и попадает в атмосферу. Отравление аммиаком возникает при его повышенной концентрации в воздухе или при длительном вдыхании небольших количеств. Аммиак наносит существенный вред здоровью человека. Токсическому воздействию подвергается сердечно-сосудистая система, резко падает артериальное давление, ослабляется сердечная деятельность, поражаются ткани печени и почек, развивается недостаточность их функции.

Однако высокая степень очитки газов – вплоть до 98–99 %, и высокая стоимость продукции может превысить все эти недостатки и окупить не только эксплуатационные расходы, но и саму установку и давать прибыль. Может быть экономически оправдана на крупных ТЭС, работающих на сернистом топливе в базовом режиме.

6.3.4. Аммиачно-циклическая технология

Эта технология во многом сходна с аммиачно-сульфатной. Здесь также используется реакция между растворенными сульфитом и бисульфитом аммония и диоксидом серы. Абсорбер также состоит из нескольких ступеней орошения, куда подают аммиак для восполнения потерь. Но в отличие от аммиачно-сульфатной технологии, насыщенный диоксидом серы раствор из абсорбера поступает в десорбционную колонну, в которой поддерживается температура 97 °С и глубокое разрежение, примерно такое же, как в конденсаторах турбин, где давление составляет 0,047 ата. В результате гидросульфат аммония NH_4HSO_4 разлагается на сульфитный раствор, который возвращается в абсорбер и на газообразный SO_2 , но в концентрации, значительно большей, чем в уходящих газах. Из десорбера смесь диоксида серы с водяным паром пропускают через конденсатор, где удаляют основную массу влаги, затем через сушильную башню, орошаемую серной кислотой. Осушенный диоксид серы охлаждают жидким аммиаком (температура кипения минус 33,3°С), в результате чего SO_2 тоже сжижается (температура кипения

минус 10 °С). Сжиженный сернистый ангидрид используется для производства серной кислоты и как консервант сельскохозяйственной продукции. Очищенные дымовые газы после удаления капельной влаги пропускают через подогреватель и отправляют в дымовую трубу.

В результате побочных реакций с кислородом воздуха, который в абсорбер специально не подается, но присутствует в дымовых газах, идет постепенное накопление элементарной серы и гипосульфита, которые необходимо выводить из цикла сероочистки.

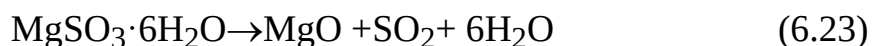
Технико-экономические показатели у этого способа сероочистки примерно такие же, как при аммиачно-сульфатной, но здесь добавляются еще проблемы работы с вакуумным оборудованием.

6.3.5. Магnezитовая циклическая технология

Магnezитовая циклическая технология основывается на реакции диоксида серы суспензией оксида магния:



После перенасыщения раствора происходит выпадение в осадок кристаллов шестиводного сульфита магния $\text{MgSO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Этот осадок отделяют от жидкости, сушат и обжигают. В результате происходит его термическое разложение



Оксид магния возвращается в абсорбер, а оксид серы конденсируется по технологии аммиачно-циклической сероочистки.

Магnezитовый способ проще, чем аммиачно-циклический, так как здесь отход выпадает в осадок в виде кристаллов и его регенерация оказывается несколько проще. Кроме этого, отсутствует ядовитый газообразный реагент. Поэтому минимальная концентрация оксидов серы в дымовых газах, при которой эта сероочистка может окупиться, несколько меньше и составляет 8 000 мг/м³ при обеспечении минимальных потерь дорогого реагента в цикле.

Степень очистки газов от SO_2 составляет 90–92 %. Достоинством магnezитового способа является возможность достижения высокой степени очистки газов без предварительного их охлаждения.

6.3.6. Натрий сульфит-бисульфитная технология

Этот способ аналогичен аммиачно-циклическому, но вместо солей аммония используются сернокислые соли натрия:



Образовавшийся сульфит натрия направляется в отгонную колонну, где при нагревании реакция идет в обратном направлении с выделением сернистого ангидрида в существенно более высоких концентрациях, чем в дымовых газах. Кроме этого, часть сульфита натрия доокисляется кислородом, содержащимся в дымовых газах до сульфата натрия, который тоже выводится из цикла. Взамен в орошающий раствор добавляют карбонатную соду Na_2CO_3 .

Для регенерации NaHSO_3 требуется больше тепла, чем при регенерации других реагентов, но зато здесь практически отсутствуют потери реагента с уходящими газами.

Данная технология, как и все циклические, хорошо работает при постоянной нагрузке котла и существенно снижает свою эффективность при переменной.

6.3.7. Сухие скрубберы

В мировой практике систем десульфуризации (ДС) сухие скрубберы занимают второе место вслед за мокрыми скрубберами. В этом типе ДС для удаления SO_2 из отходящих газов обычно используется известковая суспензия. Сухие скрубберы характеризуются более низкими капиталовложениями, но более высокими эксплуатационными расходами по сравнению с мокрыми скрубберами, благодаря использованию более дорогостоящей извести в качестве сорбента. Сухие скрубберы в основном используются на относительно небольших или средних по мощности котлах, использующих уголь с низким или средним содержанием серы (1,5 %). Они предпочтительны также для использования для работы при пиковых нагрузках. Отход технологии обычно состоит из смеси сульфита CaSO_3 и сульфата кальция CaSO_4 , а также летучей золы, что обуславливает его низкую коммерческую привлекательность.

Технология начала разрабатываться в США и Европе в начале–середине 1970-х гг. Первое коммерческое использование на тепловых электростанциях началось в США в 1980 г., где технология была использована для угольного котла (рис. 6.4) [10].

Процесс включает в основном сухой скруббер, золоуловитель, и рециркуляционное оборудование для утилизации продуктов реакции. Основное различие таких схем заключается в системе распыления известковой суспензии, используемой в скрубберах.

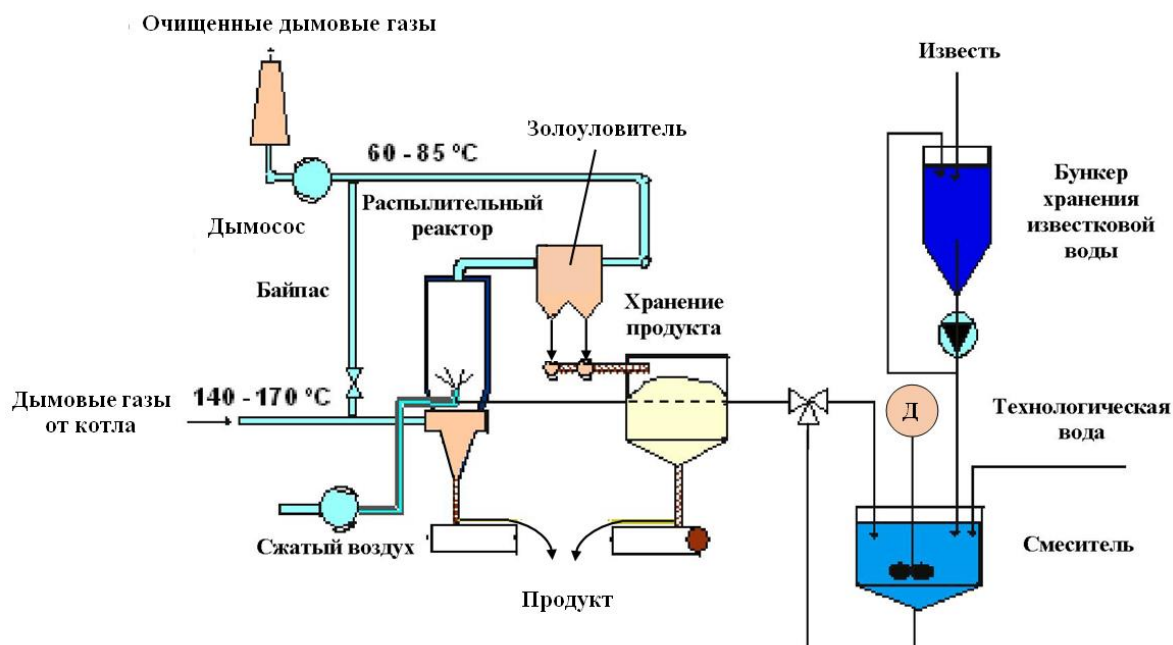
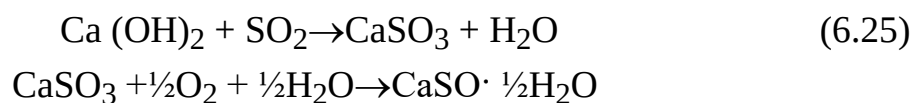


Рис. 6.4. Технологическая схема процесса сероочистки ДС с сухим скруббером [10]

Сорбентом для абсорбции SO_2 обычно является известь или оксид кальция. Известковая суспензия распыляется в виде облака мелких капель в сухом скруббере (распылительном реакторе, абсорбере), где SO_2 удаляется из дымовых газов. Вода испаряется теплом отходящих дымовых газов, обычно в течение времени (около 10 с), достаточного для того, чтобы SO_2 и прочие кислотные газы, такие как SO_3 и HCl , прореагировали с гидратированной известью с образованием сульфита/сульфата кальция и хлорида кальция. Обработка сточных вод в данном процессе не требуется, поскольку вода полностью испаряется в скруббере.

Химия процесса – это реакция абсорбции между SO_2 и гидратированной известью:



Химия абсорбции существенно зависит от таких факторов, как температура отходящих дымовых газов, влажность газов, концентрация SO_2 в дымовых газах и размер капель суспензии. Побочный продукт – это сухая

смесь сульфита и сульфата кальция, летучей золы и непрореагировавшей извести. Хотя этот процесс иногда называют полусухой процесс, поскольку он использует суспензию извести (смесь извести с водой), остатком является сухой порошок, который собирается в золоуловителе. Поскольку остаток содержит некоторое количество непрореагировавшей извести, часть его обычно рециркулируется и смешивается со свежей известковой суспензией для увеличения степени использования извести.

Использование предвключенного золоуловителя, который удаляет большую часть летучей золы перед входом в абсорбер, является обычной конструктивной чертой большинства европейских электростанций, оснащенных сухими скрубберами. Он устанавливается между воздухо-нагревателем и абсорбером. Предвключенный золоуловитель – это обычно простой электрофильтр с одним полем.

В США для размола и гашения извести обычно применяются шаровые мельницы. В Европе большинство скрубберов оснащено резервуарными гасителями удерживающего типа. Простой резервуарный гаситель может быть использован для распыления извести.

Важной частью абсорбера является сопла для распыления суспензии. Распылительные сопла могут быть ротационного типа или двойного жидкостного типа. Сопло устанавливается в центре крыши и распыляет капли гидратированной извести. Дымовые газы разделяются перед входом в абсорбер таким образом, чтобы приблизительно 60 % газа входило в абсорбер через газораспределитель в крыше, остальные 40 % – через центральный газораспределитель. Путем настройки двух потоков и правильного размещения направляющих аппаратов для распределения газа можно управлять формой облака распыленных капель и обеспечивать эффективное смешивание отходящих дымовых газов и сорбента в узкой зоне вокруг распылителя. Необходимый размер абсорбера для обработки отходящих дымовых газов от котлов мощностью от 100 МВт до 150 МВт тепловых обычно составляет 14–15 м (диаметр) и 11–12 м (высота цилиндра).

Сопла распылителя извести должны соответствовать спецификациям для поддержания постоянного качества распыления. Например, сопло должно быть устойчивым к коррозии, обусловленной отходящими газами, и известковой эрозии. Кроме того, оно должно иметь малый перепад давления и минимальный риск забивания.

Многие типы распылительных сопел используются для распыления суспензии, в том числе ротационные распылители и стационарные сопла с двойным потоком жидкости.

Использование сорбента в скрубберах выше, чем в процессах с впрыском сорбента в топку, количество непрореагировавшей извести составляет от 10 до 40 % от исходного расхода извести.

Наиболее традиционными мерами по утилизации и использованию продуктов скруббера с сухим распылением является рекультивация земель. Поскольку побочный продукт содержит непрореагировавшую известь, его нельзя утилизировать без обработки, поскольку он пылит, и существует риск неконтролируемого выщелачивания опасных компонентов. Поэтому он специально обрабатывается путем смешивания с водой и летучей золой для производства стабильного, пригодного к утилизации продукта. Отход используется также в качестве добавки к удобрениям, когда необходима сера.

Скрубберы сухого распыления обычно работают при температурах выше температуры насыщения на 20 до 30°C, в то время как температура насыщения отходящих дымовых газов находится в пределах от 45 до 55 °C. Таким образом, большинству электростанций не требуется нагрев очищенных дымовых газов.

Скрубберы сухого распыления применимы для топлива с малым или средним содержанием серы и для малых установок. Оборудование включает приготовление суспензии, подачу и распыление, все оно должно быть устойчиво к эрозии, обусловленной суспензией. Сухой твердый побочный продукт может использоваться для ряда различных строительных целей.

Процесс сухой абсорбции в скруббере является устоявшейся коммерчески доступной технологией. От суммарного объема мощностей, оборудованных сухими системами очистки, более 70 % используют процессы со скрубберами.

Капиталовложения в систему сухой абсорбции приблизительно на 30–50 % меньше, чем капитальные затраты для мокрого процесса с использованием известняка для котла такой же паропроизводительности, но эксплуатационные расходы выше, что связано с более высокими ценами на сорбент. Системы сухого распыления дешевле только для установок небольшого размера и производительности.

6.3.8. Перспективные методы сухой сероочистки

Каталитическое восстановление. В настоящее время можно выделить 3 основных процесса, основанные на прямом каталитическом восстановлении диоксида серы до элементарной серы, отличающиеся типом восстановителя: восстановление диоксида серы сероводородом, восстановление диоксида серы метаном, восстановление диоксида серы водородом, монооксидом углерода или их смесью – синтез-газом.

Применительно к тепловым электростанциям более приемлемым является восстановление диоксида серы природным газом или синтез-газом.

Для разработки катализаторов для метана и синтез-газа широко применяют оксиды алюминия, титана и кремния, используемые как в качестве носителей (в основном для восстановления монооксидом углерода), так и в качестве катализаторов (в основном для восстановления метана).

Катализатор должен обладать высокой химической устойчивостью в агрессивных условиях процесса, в частности устойчивостью к кислотам и основным газам, к дезактивации кислородом и парами воды, серой и серосодержащими соединениями.

Традиционно используемые катализаторы на основе Al_2O_3 и TiO_2 имеют тенденцию к снижению активности вследствие дезактивации в ходе эксплуатации за счет сульфатации поверхности катализаторов с образованием каталитически не активных сульфатов, которые блокируют активные центры. Разрабатываются способы снижения сульфатации путем модифицирования поверхности носителя оксидом церия или лантана. Катализаторы, устойчивые к сульфатации, например диоксид церия или смесь оксидов редкоземельных элементов, значительно дороже.

Катализаторы должны легко регенерироваться, иметь длительный срок службы и приемлемую стоимость.

Доокисление сильным окислителем до SO_3 . В качестве окислителя используется озон. Озонный способ позволяет очищать дымовые газы от оксидов серы и азота одновременно. Затем серный ангидрид связывается аммиаком. Этот метод разработан в СССР и был испытан на Молдавской ГРЭС.

Основным недостатком озонного метода является высокая энергоемкость производства озона, достигающая 6–10 % мощности энергоблока, и коррозионная агрессивность смеси серной и азотной кислот.

Фильтрация через активированный уголь или кокс. Метод основан на адсорбции SO_2 активированным углем или коксом с получением конечного продукта разбавленной серной кислоты или гипса. Недостатком является громоздкость и высокая стоимость установки.

Очистка активированной окисью марганца. Активированная окись марганца MnO_2 получается путем обработки сульфата марганца аммиаком. Тонко размолотая окись марганца подается в дымовые газы, где реагирует с SO_2 с образованием сульфата марганца. Часть уловленного в золоуловителе абсорбента возвращается на очистку дымовых газов, другая – на регенерацию. Образующийся при регенерации сульфат аммония может использоваться в качестве удобрения.

Радиационно-химическая очистка. Поток дымовых газов после ввода в него аммиака облучается пучком ускоренных электронов. Конечным продуктом является сульфат и нитрат аммония. В данном случае производится очистка от окислов серы и азота одновременно с применением электронно-лучевой технологии. Поток отходящих газов подвергается облучению электронным пучком. Электронный луч осуществляет радиолиз основных компонент дымовых газов N_2 , O_2 , H_2O . Получаемые активные радикалы доокисляют монооксид азота NO и диоксид серы SO_2 до высших окислов NO_2 и SO_3 , которые затем превращаются в кислоты HNO_3 и H_2SO_4 . Кислоты, реагируя с аммиаком, образуют белый кристаллический порошок аммонийных солей, которые улавливаются рукавным фильтром.

Получаемые продукты утилизируются: кислоты – как реагенты в химической промышленности, соли – как удобрения.

Поскольку нет способов целенаправленно облучать одни компоненты газовой смеси, не затрагивая другие, КПД процесса весьма невысок. Тем не менее, многочисленными экспериментами показано, что при поглощенной дозе излучения 1,5–2,0 Мрад ($6 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / 1000 \text{ м}^3$ газовой смеси) степень связывания оксидов серы и азота достигает 85,9 %, а эффективность очистки незначительно зависит от запыленности газового потока, количества влаги и почти не зависит от энергии ионизирующего излучения и мощности дозы излучения.

Нормативы удельных выбросов в атмосферу оксидов серы для котельных установок, введенных в эксплуатацию на ТЭС с 1 января 2001 г., для твердых и жидких видов топлива приведены в табл. 6.5.

Таблица 6.5

**Нормативы удельных выбросов в атмосферу оксидов серы
для котельных установок, введенных в эксплуатацию на ТЭС
с 1 января 2001 г., для твердых и жидких топлив**

Тепловая мощность котлов Q , МВт (паропроизводительность котла D , т/ч)	Приведенное содержание золы $S_{пр}$, % · кг/МДж	Массовый выброс S_{ox} на единицу тепловой энергии, г/МДж	Массовый выброс S_{ox} , кг/т.у.т	Массовая концентрация S_{ox} в дымовых газах ($\alpha=1,4$), мг/м ³
До 199 (до 320)	0,045 и менее Более 0,045	0,5 0,6	14,7 17,6	1200 1400
200–249 (320–400)	0,045 и менее Более 0,045	0,4 0,45	11,7 13,1	950 1050
250–299 (400–420)	0,045 и менее Более 0,045	0,3 0,3	8,8 8,8	700 700
300 и более (420 и более)	—	0,3	8,8	700
*При нормальных условиях (температура 0°C, давление 101,3 кПа) рассчитанная на сухие газы				

Контрольные вопросы

1. Приведите нормативные значения концентрации оксидов серы в уходящих газах котлов.
2. Опишите, как можно рассчитать выбросы оксидов серы.
3. Какое влияние оказывают щелочные компоненты золы на выброс оксидов серы?
4. Какой комплекс определяет связывание оксидов серы при сжигании угля?
5. При сжигании каких топлив не требуется очистка дымовых газов от оксидов серы?
6. С помощью каких внутритопочных процессов можно уменьшить выброс оксидов серы?
7. Какие реагенты используются для уменьшения выбросов оксидов серы?
8. Какие отходы от сероочистки могут представлять ценность?
9. Какие технологии применяются для очистки дымовых газов от оксидов серы?
10. Расскажите о перспективных технологиях, разрабатываемых для очистки дымовых газов от оксидов серы.

7. УМЕНЬШЕНИЕ ВЫБРОСОВ ОКСИДОВ АЗОТА

7.1. Образование оксидов азота

При сжигании всех видов органического топлива в котлах ТЭС образуются оксиды азота NO_x ($\text{NO} + \text{NO}_2$), источниками которых являются кислород и азот воздуха и азотсодержащие компоненты органической массы топлива. Из азота воздуха образуются термические NO_x и быстрые NO_x . Из связанного с органической массой азота топлива (угля, мазута) образуются топливные NO_x (рис. 7.1) [49].

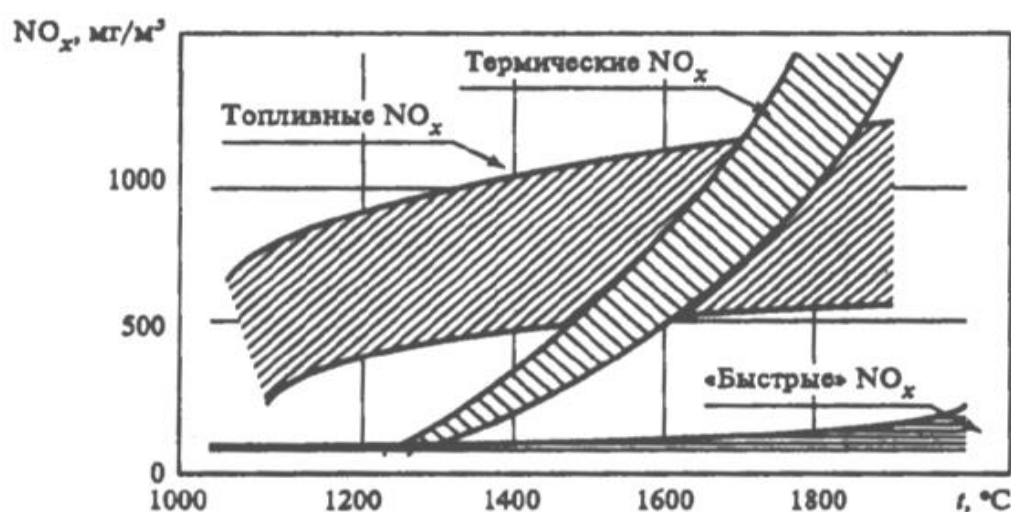


Рис 7.1. Механизмы образования оксидов азота

Азот – газ инертный, который при комнатной температуре в реакции окисления не вступает. Но при температурах порядка 500°C и выше начинается образование сначала небольших, а при температуре более 1000°C – заметных количеств оксидов азота. Для образования оксидов азота необходимо наличие в одной зоне одновременно двух факторов – высокой температуры и свободного кислорода.

Термические окислы азота образуются в итоге следующим образом:



Первая реакция идет с атомарным кислородом, образующимся при диссоциации молекул O_2 при высокой температуре. Вторая реакция идет как за счет первой, так и за счет атомарного азота, получающегося

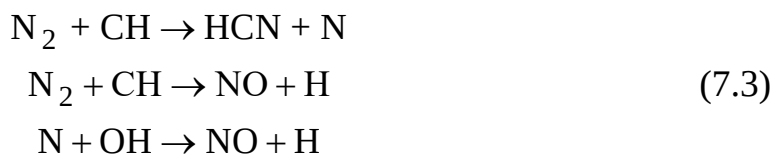
при термическом распаде азотсодержащей органической молекулы топлива. Известно, что атомы химически более активны, чем молекулы, и поэтому образование оксидов азота становится возможным.

Образование топливных оксидов азота осуществляется в два этапа: сначала происходит газификация частиц топлива с выделением азотсодержащих соединений (радикалов R) типа CN, CHN, NH, NH₂, а затем частичное окисление этих соединений по реакции:



Образование оксидов азота по этой реакции идет уже начиная с температуры 1 000 °С. Чем ниже температура горения, тем больше доля топливных оксидов азота в их общей массе. Топливные оксиды азота не образуются при сжигании природного газа (так как он, за редким исключением, не содержит связанного азота), но зато при сжигании мазута, и особенно всех видов твердого топлива (торфа, сланцев, бурых и каменных углей) доля топливных NO_x велика, а в некоторых случаях составляет 100 % общего выброса NO_x [50].

«Быстрые» NO образуются в результате быстрых реакций молекулярного азота с углеводородами, содержащимися в топливе:



Эти реакции активно протекают уже при температуре около 1 300 °С. Концентрация «быстрых» NO растет при увеличении избытка воздуха и температуры. Существенное количество быстрых NO_x образуется только при сжигании газа с коэффициентом избытка воздуха в зоне горения несколько меньше единицы.

Среди различных оксидов азота практическое значение в экологическом аспекте имеют только NO и NO₂, сумму которых принято обозначать как NO_x. Монооксид азота – прозрачный бесцветный газ, превращающийся в жидкость при температуре минус 157,7 °С и атмосферном давлении. Образующиеся при сжигании топлива оксиды азота на 96–98 % состоят из NO. Монооксид азота менее токсичен, чем NO₂, но он в атмосфере доокисляется до NO₂.

В результате выбросов оксидов азота в атмосферу происходит как региональное (кислотные дожди), так и локальное (повышение концентрации NO_2 в воздухе) воздействие на окружающую среду. Доказано, что повышенные концентрации оксидов азота в приземном слое воздуха оказывают вредное воздействие на здоровье человека, на растительный и животный мир. Кроме того, оксиды азота под воздействием ультрафиолетового излучения активно участвуют в фотохимических реакциях в атмосфере с образованием других вредных газов в составе смогов.

Основное количество оксидов азота поступает в атмосферу Земли в результате природных процессов. Оксиды азота антропогенного происхождения составляют менее 10 % всех оксидов азота. Однако именно они представляют наибольшую опасность, поскольку сосредоточены в крупных промышленных центрах.

Все это приводит к необходимости совершенствования технологий сжигания органического топлива для снижения выбросов NO_x с дымовыми газами котельных установок ТЭС.

7.2. Первичные мероприятия по уменьшению выбросов NO_x

Первичными называются малозатратные мероприятия, связанные в основном с изменением режима работы котла. Такие мероприятия наиболее просто реализуются и имеют наиболее высокую эффективность на газомазутных котлах.

7.2.1. Предельно низкие избытки воздуха

В первую очередь следует обеспечить работу котла с предельно низкими избытками воздуха (работа котла с регулируемым химнедожогом топлива [51]). Это мероприятие не только позволяет уменьшить выброс оксидов азота, но и повышает КПД котла. Для этого котел должен быть оборудован, по крайней мере, автоматическими газоанализаторами на CO .

Влияние избытков воздуха на образование оксидов азота описывается экстремальной зависимостью с максимумом для газомазутных котлов при $\alpha_{\max} = 1,15 \dots 1,25$ и для пылеугольных котлов $\alpha_{\max} = 1,3 \dots 1,5$. Причем максимум содержания NO_x в дымовых газах соответствует такому значению коэффициента избытка воздуха, при котором в данных условиях достигается наиболее полное сгорание топлива [52].

В результате уменьшения содержания кислорода в факеле происходит подавление образования как термических, так и топливных NO_x , и поэтому данное мероприятие может быть применено при сжигании любых видов органического топлива. При реализации такого режима подачу воздуха в котел следует уменьшать до появления сигнальных концентраций CO в уходящих газах. Допустимыми считаются концентрации до 200 ppm. При таких концентрациях CO экономия за счет снижения потерь тепла с уходящими газами и уменьшения затрат на тягодутьевые механизмы еще в несколько раз превышает потери за счет химического недожога топлива. При появлении таких концентраций подачу воздуха следует немного увеличить. Если концентрации опять становятся нулевыми или ниже 20 ppm, подачу воздуха следует немного уменьшить. Концентрации оксидов азота по сравнению с «заводским» режимом работы котла снижается примерно на 20 %.

К сожалению, этот процесс практически невозможно реализовать с помощью автоматики из-за очень крутой характеристики нарастания CO при уменьшении избытка воздуха в этих пределах регулирования и из-за характеристик применяемых на котлах регуляторах расхода воздуха. Режим возможно поддерживать вручную при постоянной нагрузке котла. Снижение среднего избытка воздуха на газомазутном котле производительностью $D = 420$ т/ч с 1,15 до 1,05 дает экономию более одного миллиона рублей в год на котел, не считая экономии за счет снижения платежей за выбросы оксидов азота [53].

Кроме того, сжигание топлива с предельно низкими избытками воздуха снижает низкотемпературную сернокислотную коррозию.

Предел применимости данного технологического мероприятия определяется появлением в уходящих газах продуктов неполного сгорания (CO , H_2 , ПАУ), увеличением содержания горючих в уносе, увеличением интенсивности шлакования поверхностей нагрева и высокотемпературной коррозии экранов. Для большинства отечественных котлов предельный коэффициент избытка воздуха в горелках равен 1,1...1,15 при сжигании твердых топлив и 1,02...1,06 – при сжигании природного газа и мазута. Работа на пониженных избытках воздуха предъявляет более высокие требования к состоянию котельной установки и к работе контрольно-измерительных приборов, а также к квалификации эксплуатационного персонала.

7.2.2. Нестехиометрическое сжигание топлива

Следующим мероприятием должна быть организация нестехиометрического режима сжигания топлива. Для этого зону топки нужно разбить по крайней мере на две. Наиболее просто этот режим реализуется, если горелки расположены в два и более ярусов. В нижней зоне следует обеспечить сжигание топлива с глубоким недостатком воздуха (коэффициент избытка воздуха $\alpha = 0,7 \dots 0,75$). В таких условиях должна сжигаться основная масса топлива. В результате в этой зоне оксиды азота практически не образуются, так как воздух в первую очередь вступает в реакции окисления топлива. Такой разбаланс топливо-воздушного соотношения в горелочных устройствах или по ярусам горелок достигается за счет изменения подачи топлива или воздуха или того и другого вместе. При работе на газе это достигается с помощью регулирования расхода топлива. Сложнее обстоит дело при работе на мазуте. При уменьшении давления мазута для уменьшения его расхода через горелку ухудшается его распыл. Поэтому для достижения необходимых избытков воздуха приходится применять и регулирование подачи воздуха, что более трудоемко.

В результате нижняя зона оказывается заполненной газами химического недожога CO и H_2 . Эти газы и дополнительное количество топлива должны дожигаться в верхней зоне топки, куда подается необходимое количество воздуха. В этой зоне имеется лишний воздух, но температура в ней уже значительно меньше, чем в нижней, за счет отвода части тепла экранами. Такой режим работы позволяет снизить выбросы оксидов азота при работе котла на газе в 3–4 раза и в 2 раза – при работе на мазуте. На некоторых котлах возможно и более глубокое подавление образования оксидов азота. Например, на котле ТГМ-84А при четырех горелках, установленных в два яруса на Казанской ТЭЦ-3, при нагрузке 0,8 от номинальной удавалось снижать выброс оксидов азота в 10 раз [53].

Изменение состава газов в нижней зоне, замена трехатомного излучающего газа CO_2 на плохо излучающий двухатомный газ CO приводит к уменьшению лучистого потока тепла на экраны в самой теплонапряженной зоне и способствует повышению надежности экранов [54].

На котлах с твердым топливом организация такого принципа сжигания более сложна и менее эффективна. Там требуется не менее трех зон с различными режимами сжигания топлива из-за опасности увеличения механического недожога топлива [52].

Организация нестехиометрического сжигания топлива возможна и при одноярусном расположении горелок (рис. 7.2) [53]. Схема организации зон с недостатками и избытками воздуха в горелках на противоположных экранах приведена на рис. 7.2, *а*. Здесь горелки одного яруса на одной стене работали с недостатком, а на противоположной с избытком топлива.

Более эффективно организовать нестехиометрическое сжигание позволяют горелки, которые могут менять угол наклона. В этом случае горелки на одной стене направляются вниз, и в них образуется избыток топлива, а на противоположной стене – вверх, и в них образуется избыток воздуха (рис. 7.2, *б*).

Если горелки расположены только на одной стене котла и не могут регулировать направление факела, тогда возможны схемы организации зон с недостатками и избытками воздуха в отдельных горелках, одна горелка – с недостатком, соседняя – с избытком.

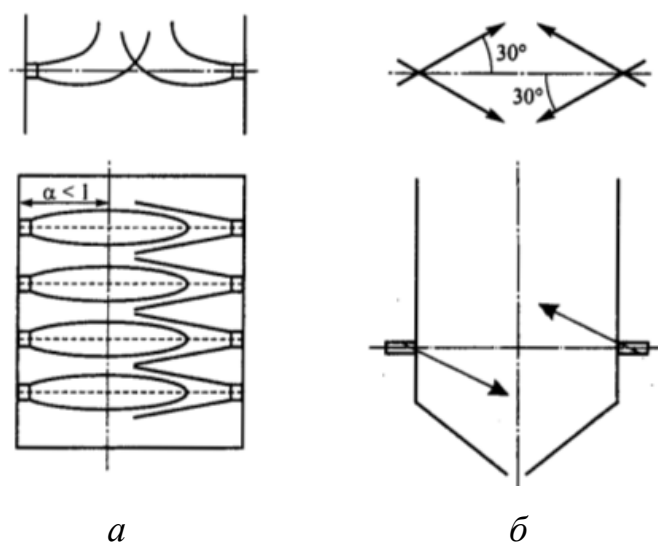


Рис 7.2. Механизмы подавления оксидов азота при одноярусном расположении горелок: *а*– обычные горелки; *б* – горелки с регулируемым направлением факела

На рис. 7.3 приведены результаты перевода в нестехиометрический режим котла БКЗ-210 с четырьмя угловыми тангенциальными горелками. Нестехиометрический режим в данном случае создавался за счет уменьшения подачи газа на одну из горелок и увеличение его подачи через остальные три при сохранении равномерного подвода воздуха.

При нестехиометрическом режиме работы котла его КПД снижается на 0,1–0,2 % за счет того, что из-за ухудшения смесеобразования приходится подавать несколько большее количество воздуха для

предотвращения заметных величин химического недожога q_3 . Нестехиометрическое сжигание дает больший эффект снижения выбросов NO_x при работе на природном газе, чем при работе на мазуте и тем более на угле. Причиной этого являются топливные оксиды азота, образование которых подавляется в меньшей степени, чем термических NO_x . На пониженных нагрузках предусматривается переход от нестехиометрического сжигания к двухступенчатому сжиганию за счет отключения верхнего ряда горелок по топливу.

В связи со сложностью процессов образования оксидов азота в котлах (иногда два, казалось бы, одинаковых котла имеют отличающиеся в два раза выбросы оксидов азота) в 1998 г. был выпущен руководящий документ РД 34.02.305-98 [24], в котором устанавливалось, что выбросы оксидов азота должны определяться опытным путем. Поэтому для каждого котла на основании промышленных испытаний разрабатываются экологические характеристики котла по выбросам оксидов азота [55].

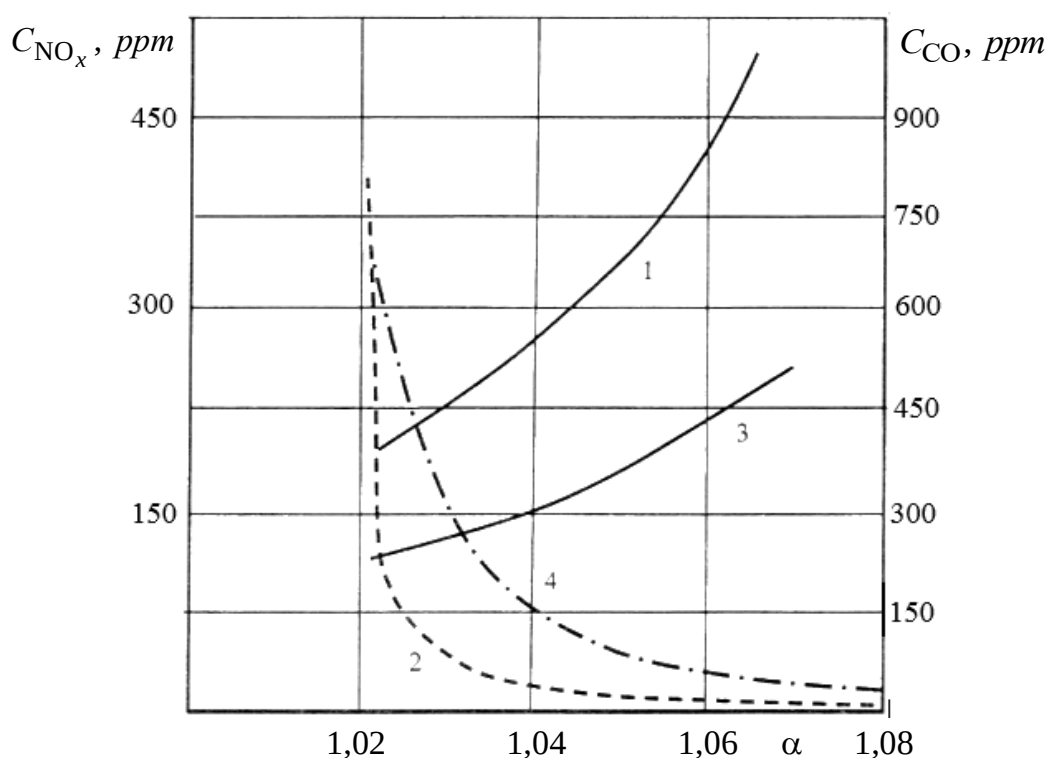


Рис. 7.3. Работа котла БКЗ-210 в заводском и нестехиометрическом режимах:
1 и 2 – NO_x и CO в заводском режиме; 3 и 4 – NO_x и CO в нестехиометрическом режим

Экологическая характеристика котла ТГМ-84Б при работе в заводском режиме [53] приведена на рис. 7.4. Сплошные линии – это работа котла на мазуте, пунктирные – на газе. Из рисунка видно, что при

сжигании мазута концентрация NO_x примерно в два раза больше, чем при сжигании газа. Как при сжигании газа, так и при сжигании мазута на выход NO_x влияют два основных фактора – нагрузка котла и коэффициент избытка воздуха. При избытке воздуха за водяным экономайзером $\alpha_{вэ} < 1,08$, как при работе на газе, так и на мазуте, в дымовых газах наблюдалось появление CO и H_2 , которые до $\alpha_{вэ} = 1,06$ находились в допустимых пределах. Дальнейшее уменьшение $\alpha_{вэ}$ хотя и приводило к уменьшению концентрации NO_x , но сопровождалось резким увеличением химического недожога. Граница появления химического недожога отмечена на рис. 7.4 штрихпунктирной линией.

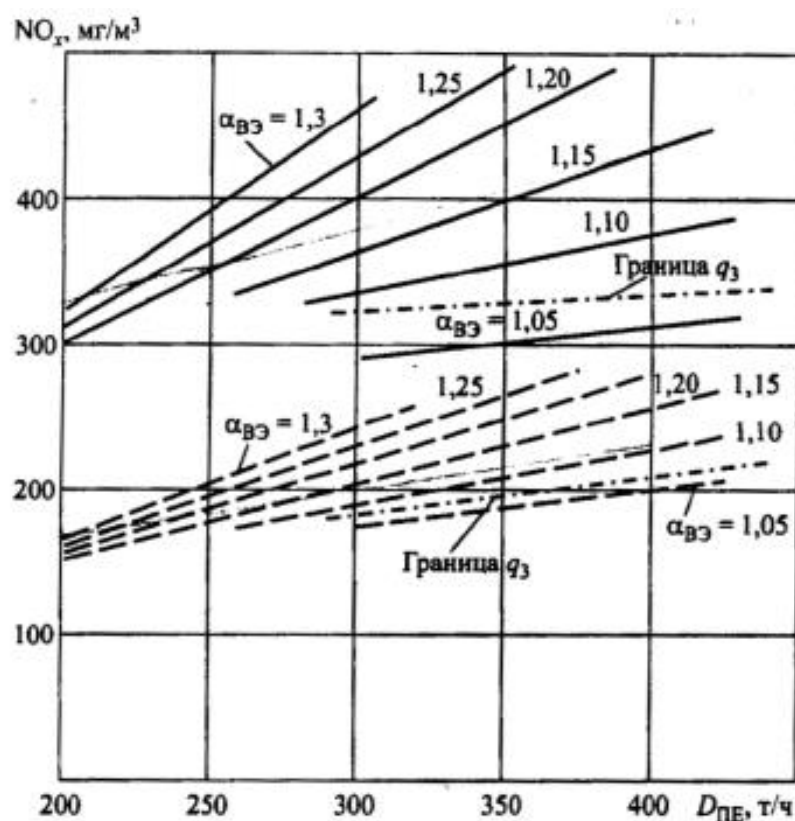


Рис 7.4. Экологическая характеристика котла ТГМ-84Б при работе в заводском режиме

Увеличение $\alpha_{вэ}$ больше 1,4 приводило уже к снижению концентрации NO_x в дымовых газах как за счет расхолаживания факела большим количеством излишнего воздуха, так и за счет разбавления их в больших объемах продуктов сгорания.

На рис. 7.5 приведена двухпараметрическая экологическая характеристика котла ТГМ-84Б при работе на газе на четырех нижних горелках с подачей воздуха равномерно через все шесть горелок [56].

Как видно из рисунка, во всем диапазоне нагрузок котел может обеспечить технологический норматив по концентрациям NO_x , но с увеличением избытка воздуха при номинальной нагрузке до $\alpha = 1,1$ (переход на верхнюю линию) для обеспечения нормальной температуры пара. При этом КПД котла ухудшается примерно на 0,15 %.

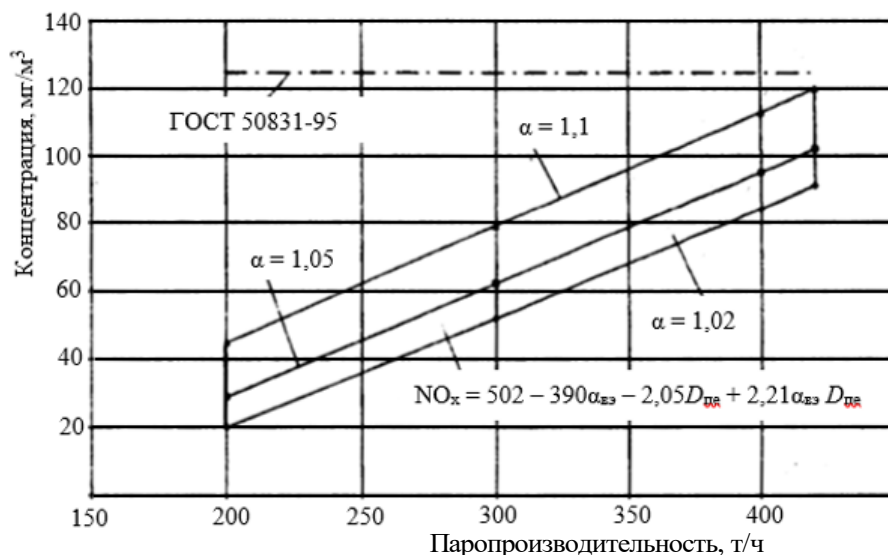


Рис 7.5. Экологическая характеристика котла ТГМ-84Б при работе в режиме двухступенчатого сжигания газа

7.2.3. Сжигание газа и мазута в разных горелках

Как видно из рис. 7.4, концентрация оксидов азота при сжигании газа примерно в два раза меньше, чем при сжигании мазута. Котлы достаточно часто могут работать с одновременным сжиганием газа и мазута в разных горелках. При этом концентрация NO_x в продуктах сгорания зависит от их соотношения. Обобщенные результаты испытаний котла ТГМ-84 Б приведены на рис. 7.6 [53].

Из рисунка следует, что если нужно сжечь определенное количество мазута, то нужно стремиться к тому, чтобы мазут сжигался в возможно большем количестве горелок. Уменьшение количества горелок с увеличением длительности сжигания мазута приведет к увеличению выбросов NO_x . Так, например, сжигание одного и того же количества мазута в одной горелке приведет к увеличению выбросов оксидов азота на 10 % по сравнению со сжиганием этого же количества мазута в трех горелках, но за более короткий промежуток времени.

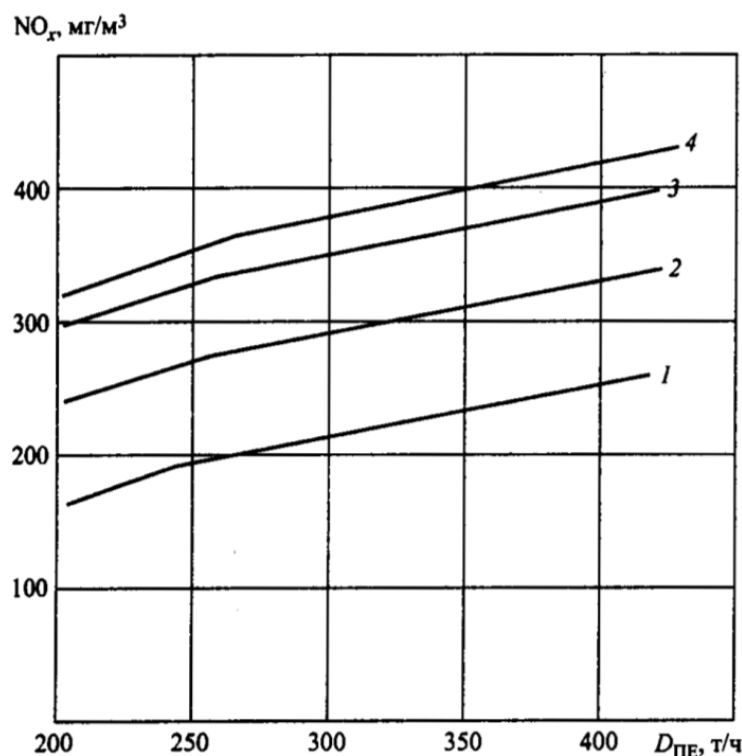


Рис. 7.6. Концентрация оксидов азота при различных соотношениях газа и мазута:
 1 – все шесть горелок на газе; 2 – четыре горелки на газе, две на мазуте;
 3 – две горелки на газе, четыре на мазуте; 4 – все шесть горелок на мазуте

7.2.4. Сжигание газа и мазута в одной горелке

Одновременное сжигание газа и мазута в одной горелке российскими заводами не предусматривается из-за возможности появления химического недожога, хотя за рубежом горелки такие горелки имеются [57]. На котле ТГМ-84Б установлены горелки с периферийным подводом газа (по наружной окружности) (рис. 7.7) [58].

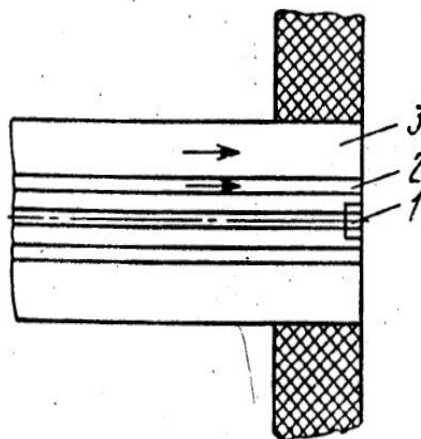


Рис. 7.7. Схема снижения выбросов NO_x при сжигании мазута

Мазут подается через форсунку 1, через канал 2 подается от 5 до 15 % от тепловыделения в горелке природного газа, через канал 3 – воздух, необходимый для полного сгорания топлива.

Газ загорается быстрее, чем пары мазута, и вокруг мазутного факела образуется смесь воздуха с продуктами сгорания газа. В результате осуществляется внутритопочная подготовка газов, аналогичных газам рециркуляции, что приводит к уменьшению образования оксидов азота на 20–25 %. При таком соотношении газ/мазут химический недожог появлялся только в течение 2–3 минут, а затем полностью отсутствовал.

Для реализации этого способа следует устанавливать датчики давления газа с более низким пределом измеряемого давления. При наличии горящего мазутного факела подача газа в эту горелку как угодно низкого давления никаких проблем не вызывает.

7.2.5. Снижение температуры горячего воздуха

В случае возникновения особо опасных метеоусловий по рассеиванию дымовых газов для временного уменьшения выбросов NO_x возможно снижение температуры подаваемого в топку горячего воздуха. Это приводит к снижению температуры факела и уменьшению генерации оксидов азота. Реализация этого способа осуществляется открытием байпасной линии у воздухоподогревателя.

Однако такой способ приводит к увеличению температуры уходящих газов и снижению КПД котла. Так, например, частичное открытие байпаса на котле ТГМ-84Б при работе на нагрузке 260 т/ч привело к снижению температуры горячего воздуха на 80 °С и увеличению температуры уходящих газов на 50 °С. Концентрация оксидов азота при этом уменьшилась на 30 %, а снижение КПД котла составило 2,4 %. Увеличение температуры уходящих газов увеличивает их подъем в атмосфере, что приводит к снижению приземных концентраций на величину, эквивалентную дополнительному уменьшению выбросов оксидов азота на 10 % [53].

7.2.6. Рециркуляция дымовых газов

Рециркуляция дымовых газов, как правило, требует установки дымососа рециркуляции газов (рис. 7.8).

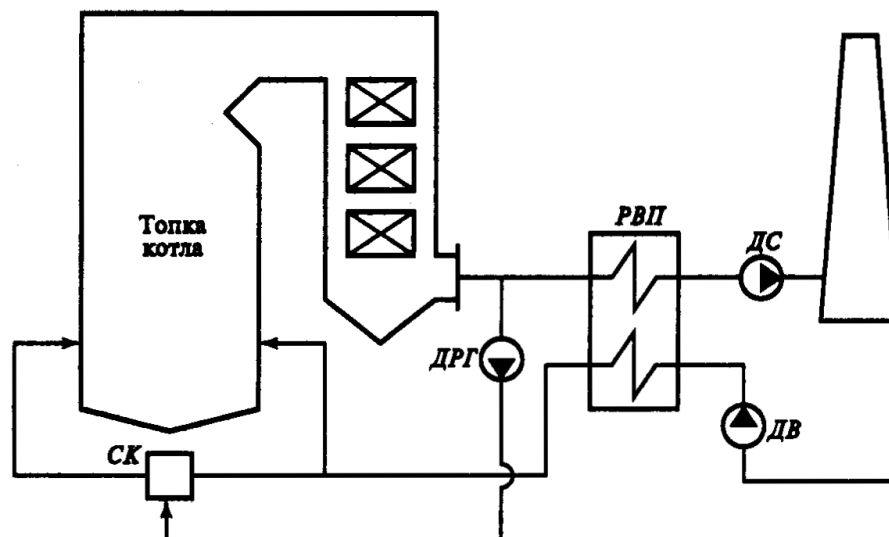


Рис 7.8. Схема рециркуляции дымовых газов: ДРГ – дымосос рециркуляции газов; ДВ – дутьевой вентилятор; ДС – дымосос; РВП – регенеративный воздухоподогреватель; СК – смешительная камера

В том случае, если есть запас по производительности у дутьевого вентилятора, можно обойтись без ДРГ, подавая газы рециркуляции на всас ДВ.

Для организации рециркуляции дымовые газы обычно отбираются после водяного экономайзера при температуре 300–400 °С и подаются в топочную камеру. При этом самым эффективным способом является подмешивание газов в дутьевой воздух перед горелками. Снижение образования оксидов азота происходит как за счет уменьшения избытка воздуха в зоне активного горения (ЗАГ), так как остаточное содержание кислорода много меньше, чем в воздухе, так и за счет ее расхолаживания, так как газы рециркуляции имеют температуру ниже температуры газов в ЗАГ.

При количестве рециркулирующих газов от 20 до 30 % удастся снизить концентрацию оксидов азота в дымовых газах примерно в два раза.

Этот способ более затратный, чем нестехиометрическое сжигание. КПД котла снижается на 0,6–1,3 %, примерно на 20 % увеличивается расход электроэнергии на собственные нужды котла.

При отсутствии ДРГ при сжигании мазута можно организовать внутритопочную подготовку газов рециркуляции (см. п. 7.2.4).

7.2.7. Впрыск воды или пара в зону активного горения

Впрыск в зону активного горения воды позволяет преимущественно снизить в ней температуру и за счет этого уменьшить образование оксидов азота. Впрыск пара позволяет преимущественно уменьшить концентрацию кислорода за счет заполнения паром объема ЗАГ, хотя в обоих случаях действуют оба этих фактора.

Неправильно организованный впрыск воды в факел может дать и увеличение образования оксидов азота [59]. Определенный эффект можно получить только если подавать воду в локальные зоны максимальной генерации NO. Однако эти зоны перемещаются по длине факела в зависимости от многих условий и обеспечить точное попадание воды именно в эти зоны практически невозможно. Тем не менее в экспериментах на котле ТГМ-84Б при подаче в топку воды до 10 % от массового расхода удавалось снизить концентрацию NO_x на 30 % [60]. При этом за счет повышения теплоемкости дымовых газов на 0,25 % возрастают потери тепла с уходящими газами и увеличивается опасность низкотемпературной коррозии при работе на серосодержащем топливе.

7.2.8. Малотоксичные горелки

Малотоксичными горелками называются горелки, в которых за счет конструктивных особенностей создаются зоны нестехиометрического сжигания в пределах одного факела. Это делается за счет 2–4-канального подвода топлива и воздуха с возможностью независимого регулирования по каждому каналу, а иногда еще с каналом подвода газов рециркуляции. Такие горелки достаточно сложны, в несколько раз дороже обычных, но позволяют получить примерно в два раза более низкие концентрации оксидов азота. Пример такой горелки приведен на рис. 7.9 [61].

Как видно из рисунка, природный газ подается в центральную часть (через конический насадок) и в среднюю часть горелки (по газораздающим трубкам). Воздух поступает по центральному и двум кольцевым каналам, причем внутренний и периферийный кольцевые каналы разделены каналом газов рециркуляции. Потоки центрального воздуха и газов рециркуляции движутся прямококом, а внутренний и периферийный потоки воздуха закручиваются в аксиальном лопаточном аппарате.

Такие горелки при сочетании с некоторыми дополнительными топочными мероприятиями позволяют обеспечить технологические нормативы как при работе на газе, так и на мазуте. Эти горелки также не создают проблем с выбросами наиболее опасных газов из числа ПАУ. Измерения показали, что в эксплуатационных режимах содержание бенз(а)пирена не превышает $0,063 \text{ мкг/м}^3$ при сжигании газа и $0,08 \text{ мкг/м}^3$ при сжигании мазута, что позволяет обеспечить концентрации бенз(а)пирена на уровне дыхания не более 0,05 ПДК. Это обстоятельство избавляет от необходимости учета и нормирования выбросов бенз(а)пирена.

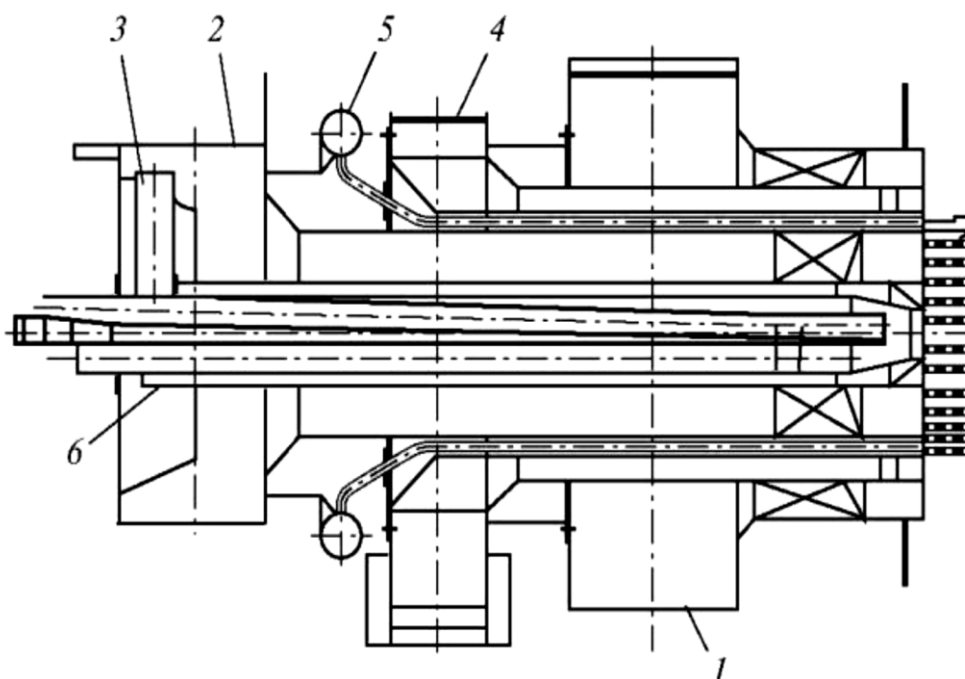


Рис. 7.9. Малотоксичная газомазутная горелка: 1–3 — каналы подвода воздуха; 4 — газы рециркуляции; 5, 6 — природный газ

При сжигании твердого топлива конструкции малотоксичных горелок также позволяют значительно сократить эмиссию оксидов азота. Практически все котлостроительные фирмы за рубежом разработали и успешно внедряют малотоксичные пылеугольные горелки. Большой известностью пользуются двухрегистровые горелки DRBXCLtm (рис. 7.10).

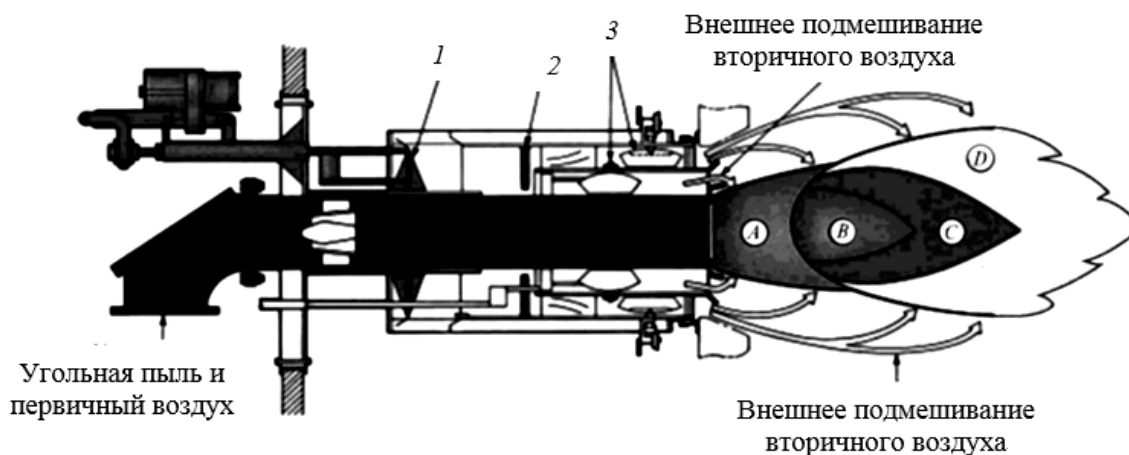


Рис. 7.10. Малотоксичная горелка для твердого топлива: 1 – скользящий воздушный шибер; 2 – измерительный прибор; 3 – регулируемый лопаточный аппарат; A – зона выхода летучих; B – зона образования газов-восстановителей; C – зона разложения NO_x; D – зона дожигания кокса

7.3. Вторичные мероприятия по уменьшению выбросов NO_x

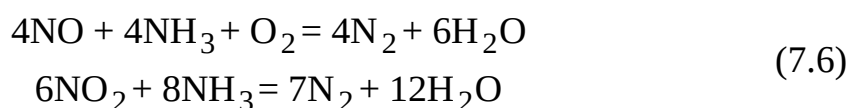
Вторичными называются мероприятия, связанные с очисткой дымовых газов. Такие мероприятия закладываются в проект станции, не могут быть в полном масштабе внедрены на действующих ТЭС и требуют значительных ресурсов для их реализации.

7.3.1. Селективное каталитическое восстановление

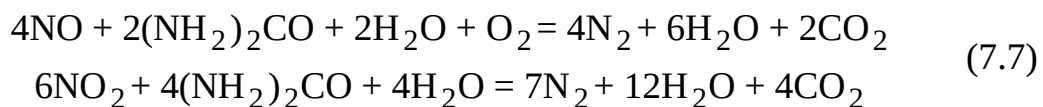
Селективное каталитическое восстановление (СКВ) в настоящее время является наиболее эффективным средством снижения выбросов NO_x на крупных энергетических котлах и уже длительное время используется на электростанциях Европы, США и Японии (рис. 7.11) [62].

Восстановительный агент, в качестве которого обычно применяют аммиак или мочевины, инжектируется в поток дымовых газов до катализатора. Вблизи поверхности катализатора в диапазоне температур 170...510 °С происходят с разной степенью интенсивности восстановительные реакции, в результате которых оксиды азота переходят в молекулярный азот.

При использовании аммиака (аммиачной воды) основные реакции имеют вид:



Если используется более дорогой реагент – мочевины, то восстановление происходит по реакциям:



Аммиак на электростанции хранится, как правило, в виде водного раствора или в сжиженном состоянии при давлении 1,7 МПа (17 бар) и температуре 20 °С. Для небольших установок часто используют более дорогую, но и более безопасную при транспортировке и хранении мочевины в виде белых кристаллических гранул, которые растворяют в воде перед инъекцией в газоход.

Водный раствор аммиака перед вводом в газоход нагревается в электрическом нагревателе. Для нагрева раствора аммиака можно использовать также пар или горячую воду. Для повышения эффективности восстановления NO_x и снижения проскока аммиака необходимо обеспечить равномерное распределение инжестируемого реагента. Только при соблюдении требуемого отношения NH_3/NO_x по всему сечению газохода перед катализатором удастся снизить проскок аммиака до его концентрации в дымовых газах, не превышающей 2 ppm (0,0002 % по объему). В противном случае продажа уловленной на пылеугольных котлах золы становится невозможной для строительной индустрии в соответствии с техническими требованиями, предъявляемыми к поставляемой потребителям сухой золе.

Другой причиной, заставляющей добиваться минимального проскока аммиака, является опасность взаимодействия NH_3 с SO_3 в дымовых газах при охлаждении последних до температуры 220 °С. Образующийся при этом бисульфат аммония повышает опасность загрязнения и коррозии поверхностей нагрева.

Многое зависит и от самого катализатора, в том числе и от формы каталитической решетки, через которую проходят дымовые газы в смеси с аммиаком. Чаще других на практике встречаются каталитические реакторы пластинчатого или сотового типа.

Все виды материалов, которые используются в качестве катализаторов для очистки дымовых газов топливосжигающих установок, можно разделить на четыре группы:

1) носитель – оксиды металла (например, TiO_2) с активными компонентами: ванадием, молибденом или вольфрамом. Часто используется V_2O_5 с небольшим количеством или WO_3 (который добавляется для

расширения рамок температурного окна), или SiO_2 (для повышения устойчивости структуры), или MoO_3 (для снижения опасности «отравления» катализатора составляющими дымовых газов);

2) цеолиты – кристаллическое природное вещество с чрезвычайно развитой пористостью или синтетические алюмосиликаты, используемые при температурах от 350 до 600 °С;

3) оксиды железа в виде частиц, покрытых тонкой кристаллической пленкой из фосфата железа;

4) активированный углерод, состоящий из размолотого каменного или бурого угля, смешанного с инертным материалом и обработанного до состояния агломерированных пеллет (гранул). Этот катализатор может работать в температурном диапазоне 100...220°С.

При выборе размера отверстий для прохода дымовых газов, количества слоев катализатора и других параметров необходимо учитывать характеристику запыленного потока, требуемую степень снижения выбросов NO_x , допустимое аэродинамическое сопротивление каталитического реактора и т. д. Опыт эксплуатации установок СКВ за рубежом свидетельствует о том, что продолжительность работы катализатора на угольных котлах составляет 6...10 лет, а на газомазутных – от 8 до 12 лет. Частота замены катализатора определяется не только характеристикой топлива, но и другими показателями установки: входной концентрацией NO_x , степенью снижения содержания оксидов азота, допустимым проскоком аммиака и т. д.

При выборе схемы включения каталитического реактора в газовый тракт котла приходится учитывать не только экономичность работы котла, но и желательную длительность работы очистной установки без замены катализатора. Всего выделяют три схемы, различающиеся условиями работы установок СКВ (рис. 7.11).

Схема А – это простейший и потому наиболее распространенный вариант, при котором каталитический реактор (DeNO_x) устанавливается за экономайзером, до воздухоподогревателя котельной установки. Температура в этой зоне газового тракта позволяет использовать большинство катализаторов. Однако работа реактора на неочищенных дымовых газах создает существенные проблемы. Во-первых, должны быть приняты меры для снижения абразивного износа. Во-вторых, продукты сгорания и летучая зола могут «отравлять» катализатор, снижая его активность.

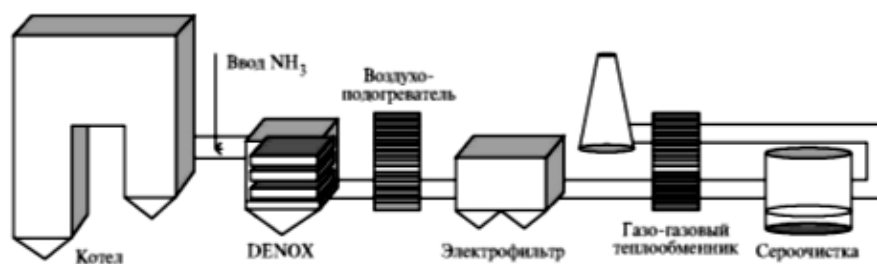


Схема А

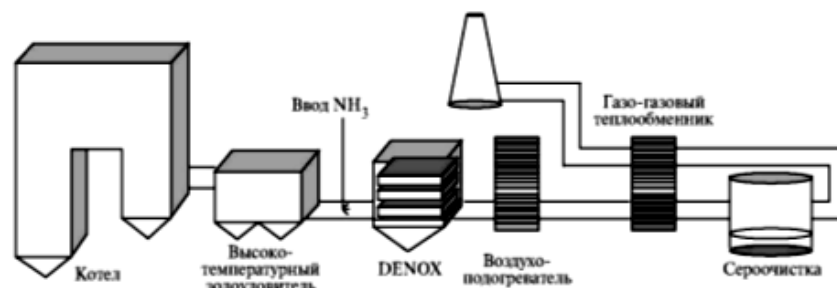


Схема Б



Схема В

Рис. 7.11. СКВ оксидов азота: схема А – установка DENO_x по схеме «хай-даст»; схема Б – установка DENO_x по схеме «лоу-даст»; схема В – установка DENO_x по схеме «тейл-энд»

Это ухудшает эффективность очистки дымовых газов от NO_x (особенно заметно это явление на котлах, оборудованных топками с жидким шлакоудалением). Еще один недостаток этой схемы – для ее реализации на действующих котлах требуется место в непосредственной близости от котла, которое не всегда удастся найти. Эта схема получила название «хай-даст» из-за работы катализатора на запыленном потоке (от англ. *high-dust*).

Схема Б, в отличие от первого варианта, называется «лоу-даст» (от англ. *low-dust*), потому что катализатор в этой схеме установлен после высокотемпературного золоуловителя (но опять же до воздухоподогревателя, что решает проблему обеспечения температуры газов в зоне реактора DeNO_x). Эта схема снижает механическое воздействие на катализатор, увеличивая тем самым срок его эксплуатации. Недостатком этого варианта считается необходимость установки малоэффективного «горячего» золоуловителя и трудность его установки при внедрении метода СКВ на действующем котле. Кроме того, сохраняется опасность образования бисульфата аммония в зоне воздухоподогревателя при проскоке аммиака.

Схема В предполагает установку реактора DeNO_x после всех поверхностей нагрева, т. е. на «хвосте». Отсюда и ее название – «тейл-энд» (от англ. *tail-end*). Эта схема больше других подходит для внедрения на действующих котлах, так как катализатор меньше подвергается износу, коррозии и деактивации.

Объем катализатора также может быть снижен по сравнению со схемой А за счет снижения шага решетки. Недостатком этого варианта является потребность в газо-газовом теплообменнике и дополнительном газовом подогревателе для обеспечения нужной температуры газов в реакторе DeNO_x .

Главной опасностью при использовании системы СКВ является проскок аммиака, который возможен при снижении каталитической активности и высоком отношении NH_3/NO_x . Проскок аммиака может вызвать:

- образование сульфата аммония с отложением его на последующих элементах газового тракта;
- появление аммиака в смывной воде при обмывке воздухоподогревателя и в отходах сероочистки;
- повышение концентрации аммиака в золе уноса.

Использование катализатора дает ряд преимуществ:

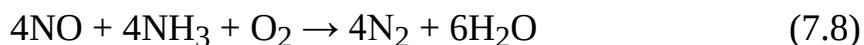
- метод годится при сжигании всех видов топлива – от природного газа до угля;
- восстановление NO не сопровождается образованием других загрязняющих веществ;
- эффективность таких установок может достигать 90 % и более;
- метод СКВ может сочетаться с любыми технологическими (первичными) мероприятиями.

Препятствием для более широкого внедрения метода СКВ являются достаточно высокие капитальные затраты на его реализацию, достигающие до 20 % от стоимости котла. Эффективность метода составляет от 80 до 95 %.

7.3.2. Селективное некаталитическое восстановление

При селективном некаталитическом восстановлении (СНКВ) процесс восстановления оксида азота в азот без катализатора проходит в температурном окне, которое зависит от вида используемого реагента. Примерный диапазон этого окна от 850 до 1100°C [62].

Основная реакция восстановления оксида азота имеет вид:



При достижении нижней границы температурного окна скорость реакции существенно снижается, а при достижении верхней границы начинает доминировать нежелательная реакция окисления аммиака:



Для реализации метода нужно смонтировать в котле собственно установку СНКВ для инъекции реагента и его последующего взаимодействия с оксидами азота до получения молекулярного азота и паров воды (рис. 7.12). Ее задачей являлось нужное распределение аммиачной воды по поперечному сечению газохода, что оказывается достаточно сложным.

Для предотвращения трудностей, связанных с изменением нагрузки котла, применяли схему СНКВ с двумя и даже с тремя местами ввода аммиачной воды. Такая схема не только увеличивала объем реконструктивных работ, но и усложняла эксплуатацию, так как все устройства для ввода NH_3 требуется охлаждать. Для интенсификации смешивания реагента с дымовыми газами разработчики должны не только оптимизировать аэродинамику вдуваемых в газоход струй, но и выбрать оптимальный размер капель аммиачной воды. Слишком мелкие капли будут испаряться быстро и при более высокой температуре, а слишком крупные будут испаряться медленнее и вступать в реакцию при более низкой температуре, что может увеличить проскок аммиака.

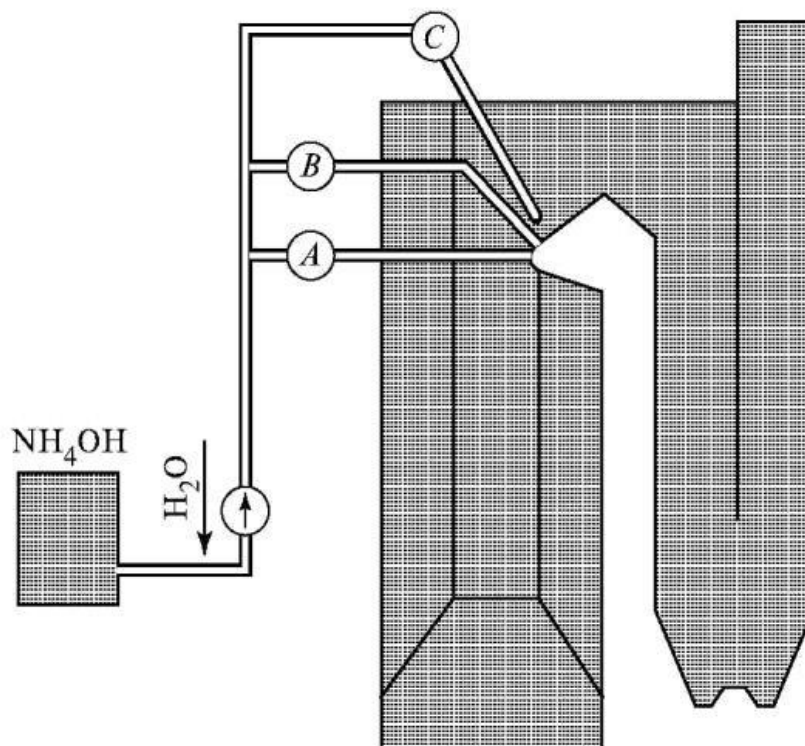


Рис. 7.12. СНКВ-установка: А, В и С – места ввода аммиачной воды

Кроме воды носителями реагента могут быть сжатый воздух или пар. В некоторых случаях реагент удастся подать в топку вместе с третичным воздухом или с газами рециркуляции, т. е. объединить метод СНКВ с одним из технологических методов снижения выбросов NO_x .

Предпочтение отдается котлам, которые работают с постоянной нагрузкой и на топливе с постоянными характеристиками. Переменные нагрузки и изменение качества топлива не позволяют добиться хороших показателей при использовании метода СНКВ. Эффективность метода составляет от 20 до 50 %.

Контрольные вопросы

1. Расскажите, чем отличаются друг от друга термические, быстрые и топливные оксиды азота.
2. Какие мероприятия по уменьшению выбросов оксидов азота называются первичными?
3. Поясните, что такое предельно низкие избытки воздуха.
4. Опишите нестехиометрический и ступенчатый режимы сжигания топлива.

5. Как нестехиометрический режим сжигания топлива влияет на тепловое излучение?
6. Расскажите, как организовать нестехиометрический режим сжигания топлива при одноярусной компоновке горелок.
7. Раскройте понятия «экологическая характеристика котла» и «двухпараметрическая экологическая характеристика котла».
8. Опишите процессы совместного сжигания газа и мазута в разных и в одной и той же горелках.
9. Какие способы снижения температуры подаваемого в топку горячего воздуха Вы знаете? Что это дает?
10. Раскройте понятие рециркуляции дымовых газов в топку котла.
11. Расскажите, чем отличается впрыск пара от впрыска воды в ЗАГ.
12. В чем заключается конструктивная особенность малотоксичных горелок?
13. Объясните, что такое селективное и неселективное каталитическое восстановление оксидов азота.

8. УМЕНЬШЕНИЕ ВЫБРОСОВ БЕНЗ(А)ПИРЕНА И СОЕДИНЕНИЙ ВАНАДИЯ

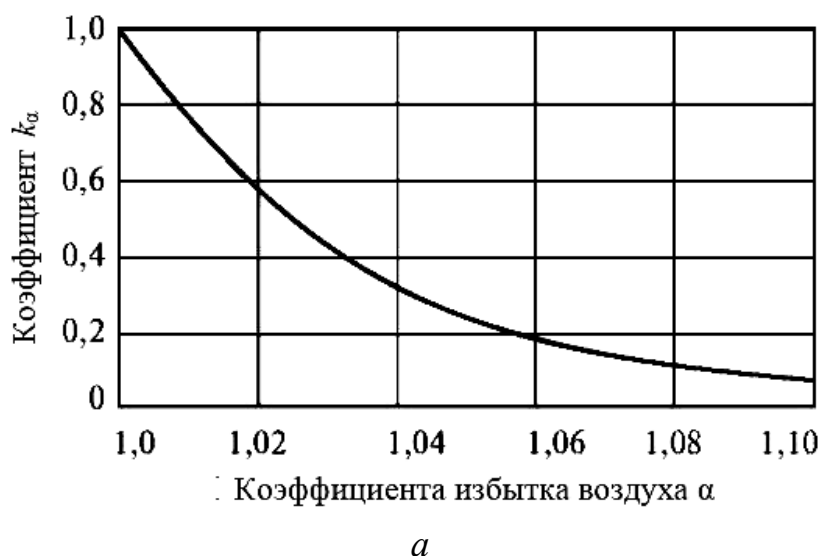
$C_{20}H_{12}$ (БП) представляет собой твердое кристаллическое вещество в виде игл бледно-желтого цвета. По степени воздействия на организм человека БП отнесен к I классу (вещества чрезвычайно опасные).

Кроме непосредственного воздействия, БП, попадая в атмосферу и взаимодействуя с оксидами азота, под влиянием солнечной радиации образует фотохимические оксиданты – компоненты фотохимического смога, что является дополнительным фактором ухудшения экологической обстановки.

Для котлов паропроизводительностью более 30 т/ч БП не входит в перечень загрязняющих веществ, выбросы которых подлежат обязательному нормированию. Тем не менее, БП может появиться и на крупных котлах при использовании режимов сжигания топлива, в которых в пределах топки появляются восстановительные зоны.

Бенз(а)пирен является одним из продуктов пиролиза любого углеводородного топлива, поэтому он образуется в той или иной степени при всех процессах, связанных с термической переработкой топлива. Вклад объектов энергетики в общее загрязнение окружающей среды БП еще недостаточно изучен, что в определенной степени объясняется отсутствием приборов непрерывного контроля концентрации БП в продуктах сгорания.

Зависимости содержания БП и ряда других продуктов неполного горения (сажи, CO , H_2) от режимных параметров работы котла носят одинаковый характер [63, 64]. Наглядно влияние этих факторов для газомазутных котлов показано на рис. 8.1 и 8.2 [62].



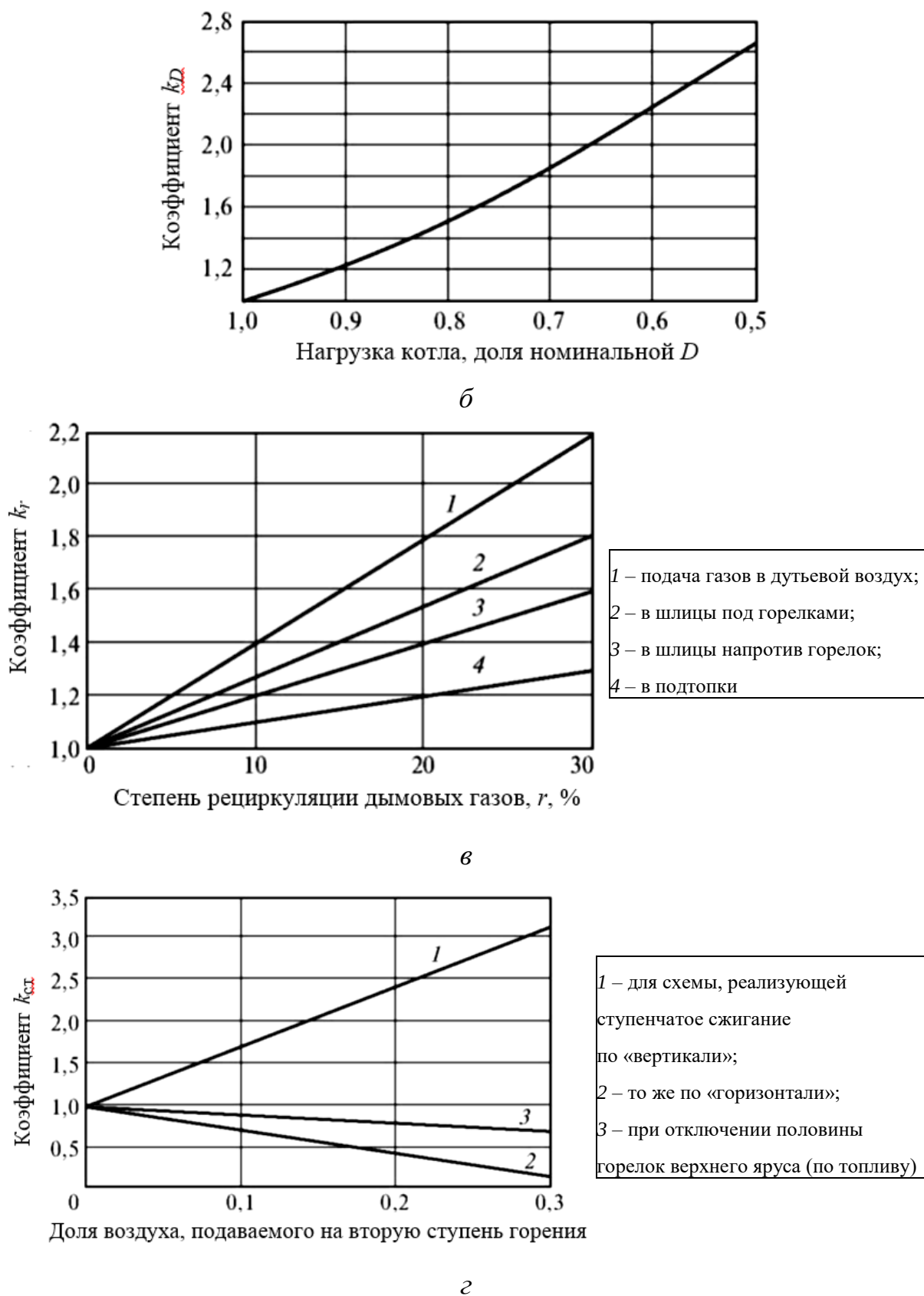


Рис. 8.1. Влияние на образование БП: a – коэффициента избытка воздуха; $б$ – нагрузки котла; $в$ – степени рециркуляции дымовых газов; $з$ – доли воздуха, подаваемого на вторую ступень горения

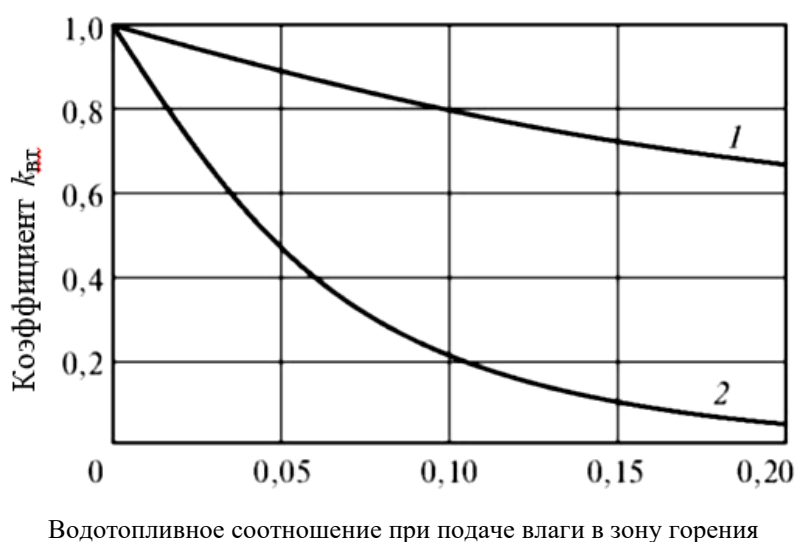


Рис. 8.2. Влияние ввода влаги в зону горения: 1 – ввод влаги в дутьевой воздух; 2 – в пристенную зону топки и зональный впрыск

Видно, что в области предельно низких значений избытков воздуха происходит увеличение БП. В то же время в диапазоне изменений избытков воздуха от 1,00 до 1,06 зависимости для оксидов азота прямо противоположны.

Результаты экспериментальных работ показывают, что применение рециркуляции дымовых газов и организация многоступенчатого сжигания топлива вызывают существенное возрастание содержания БП в продуктах сгорания. Так, на газомазутных котлах достижение максимальной эффективности снижения образования оксидов азота при одновременном применении указанных мероприятий сопровождалось в среднем 5–6-кратным увеличением содержания БП в уходящих газах.

Косвенным критерием оценки оптимального ведения процесса сжигания может служить незначительное содержание (до 10 мг/м^3) или полное отсутствие СО в продуктах сгорания. Учитывая сложность проведения прямых измерений содержания БП, содержание оксида углерода в продуктах сгорания котлов, на которых применяются технологические методы снижения NO_x , в определенной степени можно использовать для индикации превышения допустимых концентраций БП в уходящих газах.

При сжигании твердого топлива в пылеугольных котлах влияние коэффициента избытка воздуха на образование БП выражено в меньшей степени по сравнению с газомазутными котлами. При избытке воздуха $\alpha_T > 1,20$ содержание БП в продуктах сгорания в большинстве случаев стабилизируется. Но содержание БП в дымовых газах пылеугольных

котлов до золоуловителей в среднем в четыре раза превышает выбросы из котлов, сжигающих мазут. Однако за счет улавливания БП в золоуловителях его концентрация в уходящих газах снижается до значений, соизмеримых с аналогичными значениями для ТЭС, сжигающих жидкое топливо. Активная конденсация на частицах золы по мере ее охлаждения паров БП приводит к абсорбции БП в основном на мелкодисперсных фракциях летучей золы, имеющих большую удельную поверхность, поэтому повышения степени улавливания БП в золоуловителях можно достигнуть только путем повышения эффективности улавливания в них тонких фракций золы.

Степень образования БП пропорциональна теплоте сгорания топлива. На образование БП влияет наличие или отсутствие холодной воронки – при жидком шлакоудалении уровень его образования в среднем в 1,5 раза выше.

Большая часть БП вместе с уловленной летучей золой поступает в золоотвалы. При этом происходит вторичное загрязнение почвы и поверхностных вод.

Вместе с тем следует отметить, что в большинстве случаев расчеты рассеивания валовых выбросов БП как для газомазутных, так и для пылеугольных котлов показывают, что содержание БП в приземном слое воздуха не превышает 0,05 ПДК, поэтому на основании действующих нормативных документов выбросы БП не подлежат учету и нормированию.

В усредненном составе минеральной части отечественных мазутов в пересчете на оксиды содержатся: оксид натрия – 20...40 %, оксид кремния – 5...20 %, пентаоксид ванадия – 20...30 %, оксид магния – 3...10 %, триоксид железа – 3...20 %, триоксид серы – 20...40 %.

В российской энергетике мазутные котлы не имеют устройств для очистки дымовых газов от твердых частиц, поэтому в атмосферу выбрасываются практически все указанные компоненты, за исключением незначительной доли, оседающей на поверхностях нагрева котлов. Для мазутной золы в качестве контролирующего показателя принят пентаоксид ванадия, по содержанию которого в золе установлена ПДК [62].

Очистка дымовых газов от мазутной золы экономически оправдывается, если решается проблема ее утилизации и использование в других отраслях промышленности как ценного отхода энергетического производства. В некоторых отечественных мазутах содержание в золе ванадия в пересчете на V_2O_5 достигает 30 %, что является очень высоким показателем для ванадийсодержащего сырья. Учитывая, что в мазутной

золе содержатся и другие микроэлементы, ее можно с успехом использовать в металлургии при производстве легированных сталей.

Для улавливания мазутной золы нужны специальные электрофилтры. Основными отличиями от пылеугольных являются повышенные требования к агрегатам питания, изоляторам высокого напряжения, системам выгрузки. Для предотвращения отложений уловленных частиц внутри изоляторов устанавливают вентиляторы, создающие избыточное давление в отсеках изоляторов во избежание электрического пробоя. Учитывая повышенную адгезионность золы мазута, ее гигроскопичность и повышенную способность слеживаться, электрофилтры оборудуют нагревателями для повышения температуры газов при пуске котла выше точки росы. Для надежного удаления золы из бункеров устанавливаются электрические или паровые (змеевиковые) обогреватели бункеров под тепловой изоляцией.

Значительные трудности при эксплуатации электрофилтров на мазутных котлах связаны с налипанием твердых частиц. Для предотвращения этого явления впрыскивают аммиак в газоход перед электрофилтром.

Чтобы избежать скопления уловленных частиц в бункерах под электрофилтрами, их необходимо непрерывно удалять из бункеров.

При налипании частиц к электродам и другим элементам, когда при встряхивании не удастся полностью удалить уловленные частицы, степень их улавливания снижается. Характеристики электрофилтров восстанавливаются в результате водных промывок электродов, газораспределительной решетки и бункеров. Эффективность улавливания электрофилтрами твердых частиц при сжигании мазута достигает 95 %. Наличие присадок в мазуте снижает эффективность улавливания до 65...87 %.

Весьма эффективным средством улавливания мазутной золы являются тканевые филтры. Дымовые газы поступают в верхние отверстия рукавов, филтруются и выходят через боковые поверхности филтрующей ткани. На газоходах предусмотрены заслонки, позволяющие направлять дымовые газы в обход установки при работе котла на газе. Перед входом газов в филтровальную установку в них вводится щелочная присадка для нейтрализации SO_3 .

Рукава обычно очищают каждый час путем изменения направления потока газов в течение примерно 1 мин (поочередно по секциям) при помощи вентиляторов, высасывающих отфилтрованный газ обратно через боковые поверхности рукавов в их открытые нижние торцы. Для защиты рукавов от излишнего прогиба ткани во время очистки вдоль

внутренней их поверхности устанавливаются проволочные кольца. Обратный поток газа сбрасывает часть уловленной золы, которая затем удаляется при помощи гидравлической системы. Скорость фильтрации при температуре газов 125 °С составляет около 0,3 м³/мин на 1 м² фильтрующей ткани. Эффективность улавливания твердых частиц при использовании тканевых фильтров может достигать 95 %.

В ряде стран на мазутных котлах довольно широкое распространение получили механические уловители. Чаще всего для этих целей применяют литые или сварные из конструкционных сталей батарейные циклоны (БЦ) с диаметром элемента 152...305 мм.

Одной из существенных трудностей при эксплуатации батарейных циклонов на мазутных котлах является отложение уловленных частиц в элементах, что приводит с течением времени к снижению эффективности и росту аэродинамического сопротивления аппарата. Для предупреждения подобных отложений аппараты оборудуют промывочными устройствами.

Промывка аппарата в течение 24 ч обеспечивает его полную очистку. Для промывки используется вода под давлением 0,7 МПа.

Аэродинамическое сопротивление аппарата составляет около 800 МПа, рекомендуемая температура дымовых газов перед аппаратом – примерно 200 °С. Степень улавливания частиц меняется от 70 до 90 %. Батарейные циклоны не рекомендуется использовать там, где предполагаются большие колебания нагрузки котлов.

Удаление из бункеров золоуловителей твердых частиц, образующихся при сжигании мазута, является достаточно сложной задачей. Это объясняется их высокой гигроскопичностью и потерей сыпучести при температурах ниже 150 °С, а также высоким содержанием в золе горючих.

Для этой цели применяют пневматические и гидравлические системы. В пневматических системах для транспортировки уловленных частиц используют воздух с температурой не ниже 150 °С. Недостатком является возможность попадания воздуха в бункеры уловителя, что может вызвать самовоспламенение уловленных частиц.

Реже применяются гидравлические системы удаления уловленных частиц. В этом случае уловленный материал из бункеров ссыпается в резервуар, заполненный водой, затем под давлением перемещается в отстойный резервуар. В качестве транспортирующей среды используется подаваемая насосом вода. Накапливающийся в отстойном резервуаре материал забирается ковшовыми элеваторами и загружается в автомашины.

В связи с тем, что в уловленном материале содержится большое количество углерода, в некоторых схемах предусмотрен возврат уловленных частиц на повторное дожигание.

Контрольные вопросы

1. Напишите химическую формулу бенз(а)пирена.
2. Каков вклад бенз(а)пирена в общей сумме вредных выбросов?
3. Опишите, как влияет избыток воздуха на выброс бенз(а)пирена.
4. Опишите, как влияет нагрузка котла на выброс бенз(а)пирена.
5. Опишите, как влияет рециркуляция дымовых газов на выброс бенз(а)пирена.
6. Опишите, как влияет доля воздуха, подаваемого на вторую ступень горения на выброс бенз(а)пирена.
7. Опишите, как влияет ввод влаги в топку на выброс бенз(а)пирена.
8. В каких выбросах содержится пентаоксид ванадия и где его можно использовать?
9. Опишите, что представляет собой электрофильтр для мазутной золы.

9. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СЖИГАНИЯ ТОПЛИВА

9.1. Сжигание твердого топлива в котлах с кипящим слоем

Топки с кипящим слоем (КС) занимают промежуточное положение между топками слоевого сжигания и факельными топками. Со слоевыми топками их объединяет возможность сжигания дробленки и наличие решетки, через которую в слой подается воздух. При повышении скорости воздуха, продуваемого через слой, наступает момент, когда аэродинамическая сила, действующая на каждую частицу топлива, преодолевает силы трения частиц друг о друга. Дальнейшее увеличение расхода воздуха приводит к псевдоожиганию частиц топлива, слой как бы кипит (отсюда название «кипящий слой»), высота и порозность его увеличиваются [62].

В топках с КС количество горючего материала составляет обычно небольшую долю от массы слоя – основу его составляет инертный материал или зола топлива (при сжигании высокозольных углей).

Интенсивное перемешивание твердых частиц под воздействием ожимающего воздуха, проходящего через слой зернистого материала, обеспечивает повышенный тепло- и массообмен в слое. Погруженные в КС поверхности нагрева позволяют поддерживать температуру на таком уровне, который не приводит к шлакованию слоя и самих поверхностей нагрева.

Повышенный тепло- и массообмен в слое позволяет получить более высокий коэффициент теплопередачи в экранных трубах, чем у котлов с факельным сжиганием. Поверхностное горение дробленки позволяет обеспечить низкие температуры горения (800–950 °С), что в свою очередь обеспечивает отсутствие термических оксидов азота, и существенно снизить выбросы NO_x в атмосферу.

Такое горение создает условия медленного выгорания топлива и относительно длительное его пребывание в КС, что позволяет добавке известняка в слой связать основную часть серы топлива с зольным остатком и снизить выбросы диоксида серы с дымовыми газами в атмосферу.

Котлы с КС не требуют системы пылеприготовления, что снижает затраты на сооружение котельной, а также ремонтные расходы, позволяя в то же время сжигать уголь с повышенной зольностью и отходы некоторых производств.

На рис. 9.1 показан котел со стационарным кипящим слоем ЕПр-420-140КС производительностью 420 т/ч. Котел имеет стандартные параметры пара барабанных пылеугольных котлов аналогичной

производительности (13,4 МПа, 560 °С), но масса металла под давлением у него в 1,5 раза, а общая масса металла в 2 раза меньше, чем у котла Е-420-140 с факельным сжиганием.

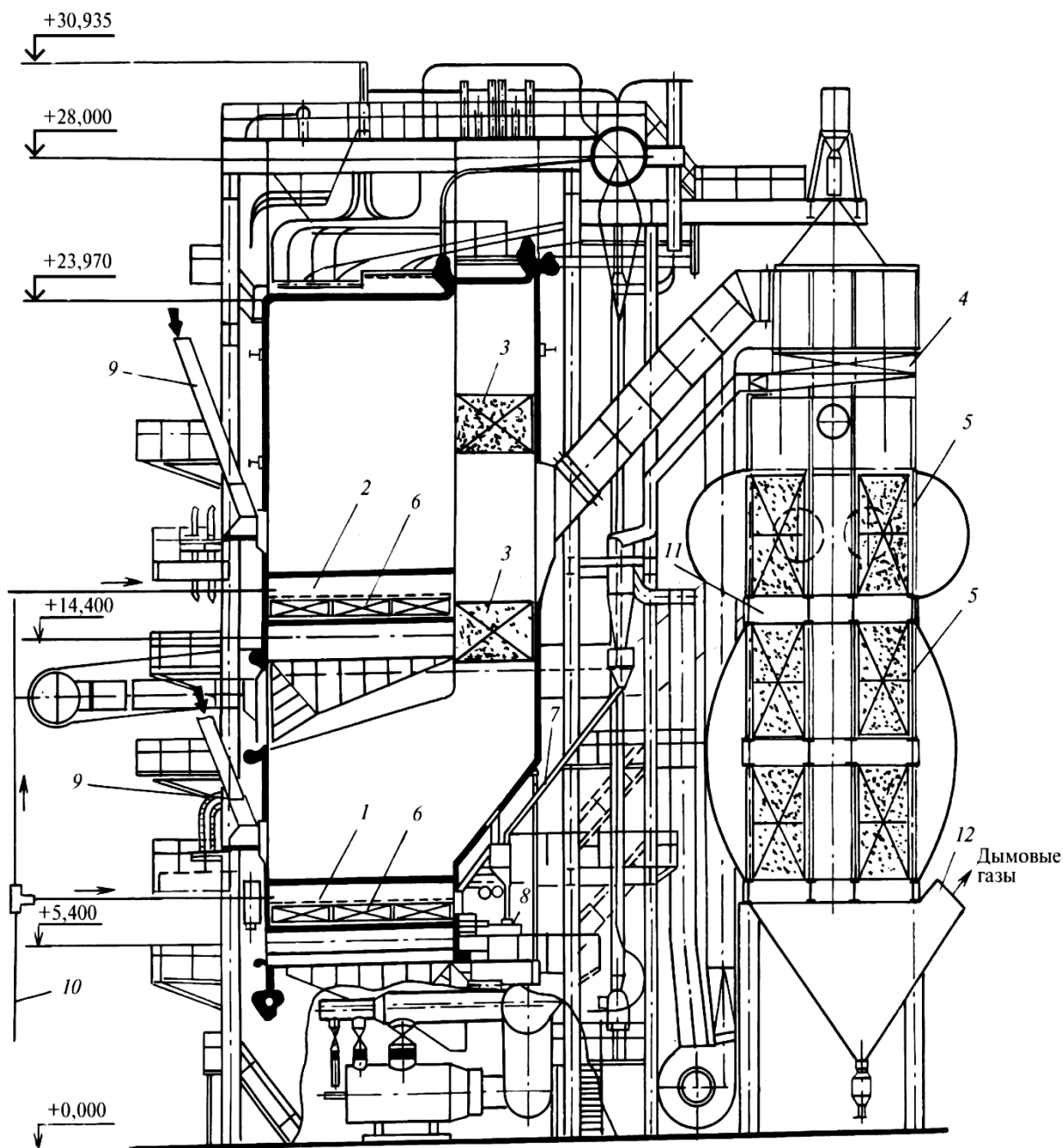


Рис. 9.1. Котел БКЗ ЕПр-420-140КС со стационарным кипящим слоем:
 1 – нижняя секция с КС; 2 – верхняя секция; 3 – экономайзер; 4 – золоуловитель;
 5 – воздухоподогреватель; 6 – испарительные и пароперегревательные пакеты труб,
 погруженные в КС; 7 – пневмотранспортная линия возврата; 8 – пневмотранспортная
 линия с делителями мелкой фракции топлива (0...1 мм); 9 – точка подачи дробленого
 топлива (1...25 мм); 10 – пневмотранспортная линия подачи наполнителя слоя;
 11 – отбор газов на подсушку угля; 12 – газоход к электрофильтру

Топка котла имеет четыре самостоятельные секции КС, расположенные попарно одна над другой. Одна из четырех секций служит для дожигания уловленного в циклонах уноса. Котел имеет принудительную циркуляцию, испарительная система и пароперегреватель расположены в КС. Парогенерирующие поверхности нагрева в камере сжигания над КС выполнены из мембранных труб, подвешенных на каркасе котла. В переходном газоходе размещены горячие циклоны для отделения уноса, который возвращается для дожигания в КС.

Экономайзер и воздухоподогреватель расположены в хвостовой части котла. Нагрузку котла можно регулировать в диапазоне 70...100 %. Отключением отдельных секций можно достигнуть минимальной нагрузки, равной 30 % номинальной мощности.

Для подачи воздуха в топку установлено два параллельно работающих напорных вентилятора. Скорость продуктов сгорания, проходящих через КС, принята равной 2,5 м/с (максимальная 3,5 м/с). Решетка образована системой колпачков, которые вварены в полки горизонтальной части мембранного экрана, который образует камеру для распределения воздуха.

Котел рассчитан на сжигание бурых углей Канско-Ачинского бассейна, минеральная часть которых содержит оксид кальция и установлен на Барнаульской ТЭЦ-3.

Зарубежные энергоснабжающие компании отдают предпочтение котлам с циркулирующим кипящим слоем (ЦКС).

Технологии КС и ЦКС основаны на одном и том же принципе. Воздух вдувается в топочную камеру, где размещается сформированный золой, топливом и известняком слой, который оживляется этим воздухом. Псевдоожижение вызывает турбулентное перемешивание, повышающее эффективность сжигания топлива и улучшающее связывание известняка с диоксидом серы, образовавшимся при окислении серы топлива. В пузырьковом слое скорость воздуха и образующихся в топочной камере дымовых газов низкая (порядка 2 м/с), и можно визуально наблюдать границу слоя.

Турбулентность достаточна для удовлетворительного сжигания высокорекреационных топлив, но не тощего угля. В циркулирующем кипящем слое скорость составляет около 5 м/с, и материал слоя выносятся в верхнюю часть топочной камеры. Для возврата этого материала в топку устанавливают сепаратор, а уловленный в нем вынесенный из слоя материал возвращают в нижнюю часть топочной камеры. Так образуется контур циркуляции твердых частиц, который и дал название технологии.

На рис. 9.2 показан котел с циркулирующим кипящим слоем и внутритопочным сепаратором.

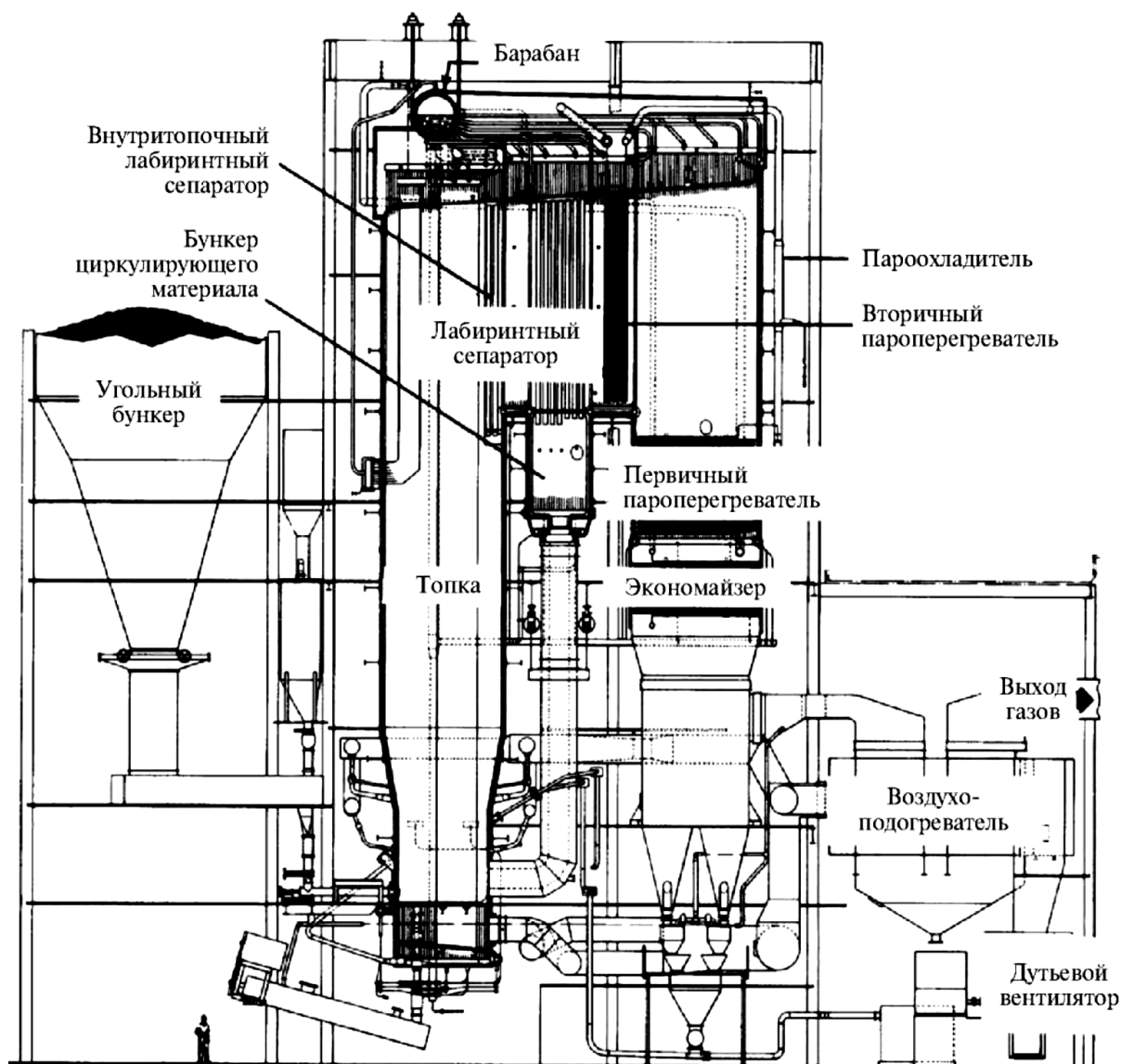


Рис. 9.2. Котел с циркулирующим кипящим слоем и внутритопочным сепаратором

Котлы с ЦКС отличаются более высокой степенью выгорания топлива (примерно 99 % по сравнению с 90...95 % у котлов со стационарным кипящим слоем), они могут работать с меньшим коэффициентом избытка воздуха (1,10...1,15 вместо 1,20...1,25). Системы подачи топлива у котлов с ЦКС проще, котлы менее требовательны к качеству топлива и лучше приспособлены для ступенчатого сжигания, необходимого для снижения выбросов оксидов азота. Такие топки позволяют связывать более 90 % серы при мольном отношении $Ca/S=2$, в то время как в топки со стационарным КС требуется подавать больше известняка ($Ca/S=3$) для связывания 80...90 % серы.

Котел позволяет сжигать различные видов топлива, устойчиво работает при низких нагрузках без подсветки мазутом, достаточно быстро пускается, работает без шлакования и с минимальным загрязнением поверхностей нагрева, размещается в ячейках котлов с факельным сжиганием аналогичной производительности, обеспечивает нормативы по выбросам NO_x и SO_2 без очистки дымовых газов.

В последнее время разрабатываются к топкам с кипящим слоем под давлением (КСД). Основное достоинство таких топок состоит в возможности осуществления комбинированного цикла, когда генерируемый в котле пар используется в паровой турбине, а продукты сгорания, имеющие повышенное давление, используются в газовой турбине. Такая схема повышает термодинамический КПД цикла, а также позволяет снижать габаритные размеры топочных устройств и уменьшать вредные выбросы в атмосферу.

Изготовление котлов с КСД позволит почти на 60 % сократить их габаритные размеры по сравнению с котлами обычного типа. В результате экономия на капитальных затратах составит 10 %.

Процесс сжигания топлива в КСД под давлением реализуется в парогазовых установках (ПГУ) по схеме, представленной на рис. 9.3.

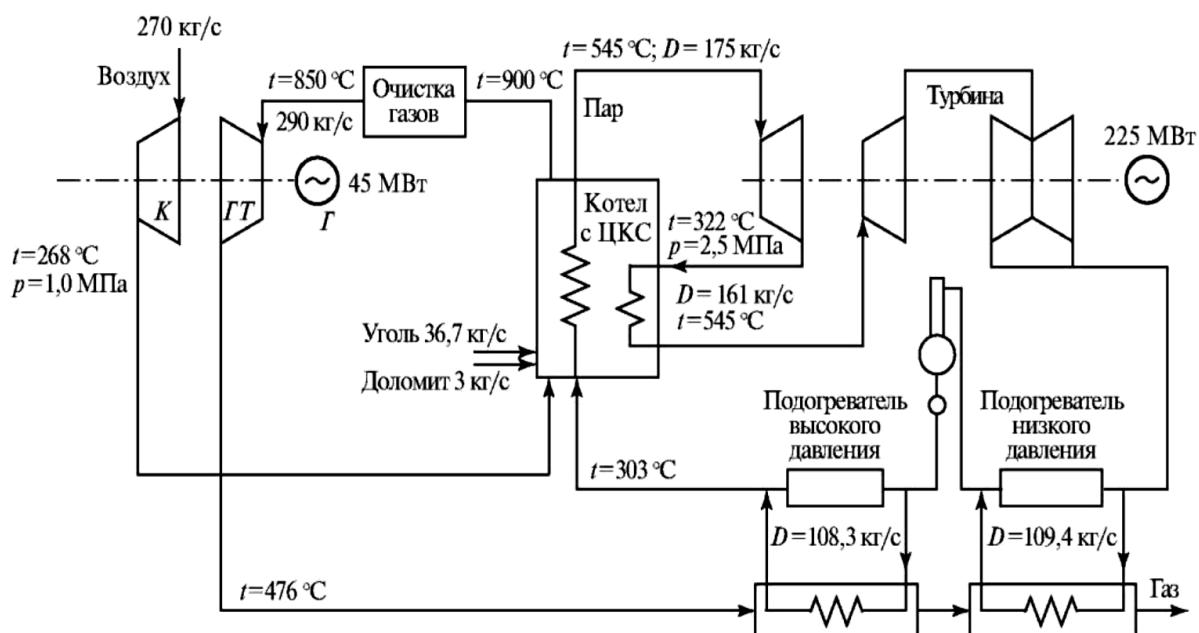


Рис. 9.3. Парогазовая установка с котлом с циркулирующим кипящим слоем под давлением

Необходимый воздух подается в слой компрессором К газотурбинной установки (ГТУ) под давлением 1,0...1,5 МПа; продукты сгорания после очистки от золы и уноса расширяются в газовой турбине ГТ и производят полезную работу. Тепло, выделившееся в слое, и тепло газов, отработавших в турбине, используются в паровом цикле [62].

Достоинствами ПГУ с КСД являются сжигание любых сортов угля, высокие коэффициенты теплопередачи и небольшие поверхности нагрева, низкие (750...950, в среднем 850 °С) температуры горения и вследствие этого небольшие (200 мг/м^3) выбросы NO_x , возможность добавки в слой сорбента и связывания в нем 90...95 % содержащейся в угле серы, отсутствие шлакования и стоков, небольшая потребная площадь (в частности, из-за отсутствия систем очистки уходящих газов).

Результаты эксплуатации ПГУ с КСД свидетельствуют о том, что использованные в них технология и оборудование вполне работоспособны и обладают хорошей управляемостью.

Особенностью ГТУ является работа на запыленных, очищенных только в циклонах газах, которая обеспечивается некоторым снижением скоростей в проточной части турбины и применением защитных покрытий.

Горение происходит в глубоком и плотном пузырьковом КС, состоящем в основном из инертного материала, в котором содержится менее 0,5 % горящих частиц.

В Российской Федерации низкая цена и доступность природного газа делают такие установки пока неконкурентоспособными для отечественной энергетики.

9.2. Сжигание твердого топлива в расплаве

Еще одним примером новой технологии использования твердого топлива, позволяющей решать проблему защиты окружающей среды, является метод газификации угля в шлаковом расплаве [62]. Сущность этого метода заключается в следующем [63]. Твердое топливо подается в специальную камеру-газификатор, которая является составной частью энергетического котла. При пуске ванна камеры-газификатора заполняется жидким шлаком, требуемый объем которого в дальнейшем поддерживается автоматически. С помощью фурм-горелок слой шлака продувается обогащенным дутьем, благодаря чему он поддерживается в состоянии газошлаковой эмульсии. Уголь в расплав подается без какой-либо предварительной подготовки. В целях связывания серы и обеспечения

определенных вязкостных характеристик расплава к углю добавляется известняк. Выходящий генераторный газ дожигается в топке расположенного над камерой-газификатором котла (рис. 9.4).

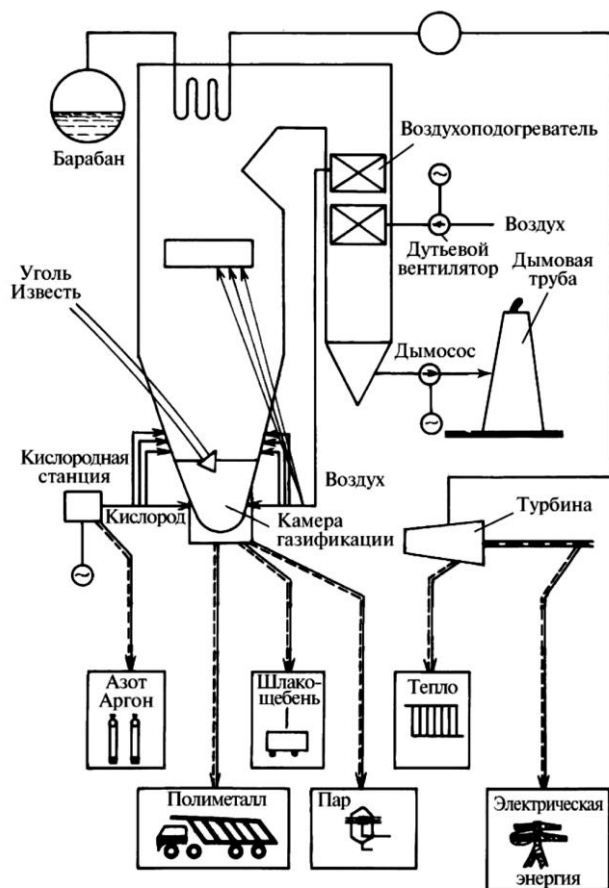


Рис. 9.4. Схема котельной установки с газификацией угля в расплаве шлака

При барботировании расплава парокислородосодержащим дутьем в камере-газификаторе шлак претерпевает сложные физико-химические превращения с восстановлением металлов и накоплением их в донной части камеры. Этот так называемый тяжелый шлак представляет собой чугун или ферросилиций, в котором, как в извлекающей фазе, достигаются относительно высокие концентрации цветных и редкоземельных металлов, что делает эффективной дальнейшую переработку данного ценного сырья на предприятиях черной и цветной металлургии. Тяжелый шлак сливается из камеры-газификатора периодически в изложницы разливочной машины, где охлаждается, затем направляется в виде отдельных чушек на склад готовой продукции. Легкий шлак, состоящий из оксидов кремния, кальция, алюминия, магния, натрия и калия, сливается из верхней части ванны камеры-газификатора и поступает на установки переработки его в товарную продукцию.

Технология газификации угля в барботируемом парокислородным дутьем шлаковом расплаве имеет ряд преимуществ:

- возможность использования любых низкосортных и непроектных углей независимо от их марки и качества;
- безотходность по золошлакам, которая обеспечивается переводом практически всей минеральной части топлива в расплав и возможностью корректировки его состава в целях вторичной переработки;
- восстановление и вывод из расплава черных и цветных металлов;
- высокая экологическая чистота, особенно по твердым выбросам (50 мкг/м^3) и оксидам азота (100 мг/м^3), снижение на 30 % выбросов SO_2 и на 10 % выбросов CO_2 ;
- возможность регулирования за счет изменения количества подаваемого в расплав известняка перехода сернистых соединений в газообразную (дымовые газы) или жидкую (шлаки) фазу и связывания шлаком до 90 % серы топлива;
- отсутствие громоздких систем топливоприготовления, пылеподачи и золоочистки; отсутствие золоотвала;
- широкая реализация дефицитных попутных газов кислородной станции (азота, аргона) для нужд предприятий региона;
- высокая экономическая эффективность, в том числе за счет дальнейшего расширения ассортимента реализуемой продукции из минеральной части топлива.

9.3. Сжигание водомазутной эмульсии

В результате разогрева мазута непосредственным контактом с греющим паром его влагосодержание может составлять от 2 до 15 %. В схемах мазутных хозяйств предусматриваются меры по отстаиванию и сливу этой воды, а после этого по перемешиванию мазута и воды для предотвращения появления в мазутопроводах водяной пробки. Такие пробки могут привести не только к погасанию отдельной горелки, но и всего котла. При наличии таких проблем действенным средством их избежать является сжигание мазута в виде водомазутной эмульсии (ВМЭ).

Под ВМЭ понимается смесь мазута с водой, в которой вода содержится в виде капель размером до 10 мкм. Учитывая, что плотности мазута и воды близки и малый размер капель воды, получается новый, достаточно стабильный вид топлива, свойства которого не меняются за время практического его использования. Наиболее эффективным способом получения ВМЭ является использование принципа кавитационного перемешивания.

Для эффективного механического распыла мазута его вязкость не должна превышать 3° ВУ , что для мазута М-100 соответствует температуре 125°С . Давление мазута перед форсунками обычно бывает в пределах 1,5–3,5 МПа. Вода, которая находится в мазуте, имеет давление и температуру мазута и поэтому не кипит. Но если увеличить скорость мазута за счет сужения канала, то произойдет перераспределение полного давления с увеличением динамического напора и падением статического давления. Если статическое давление снизится до давления ниже давления насыщения при этой температуре, то произойдет вскипание капель воды. В связи с турбулентностью будет происходить последовательное вскипание отдельных порций воды. При этом объем пара больше объема воды в десятки и сотни раз. Такие последовательные внутренние паровые «взрывы» разрывают объем мазута на отдельные порции, которые перемешиваются с паровыми включениями. Но затем такая смесь попадает в диффузор, где происходит падение скорости движения и восстановление статического давления до давления выше насыщения. При этом происходит мгновенная конденсация паровых объемов и превращение их в мелкие капли воды. При необходимости процесс повторяют еще раз, получая в результате достаточно равномерное распределение более 90 % массы включенной воды в виде капель основным размером менее 3 мкм.

Такое топливо ведет себя в факеле горения следующим образом. После выхода из форсунки капли мазута с водяными включениями имеют размер от 50 до 500 мкм и более. Вода, находящаяся внутри капель мазута, нагревается до температуры кипения быстрее, чем мазут. В результате капля мазута разрывается образовавшимся внутри нее паром на более мелкие, которые быстрее прогреваются и испаряются, что интенсифицирует процесс горения. При этом требование тонкого распыла мазута в форсунках снижается.

Но, с другой стороны, эта вода при кипении поглощает большое количество тепла из факела, что снижает температуру в факеле и замедляет процесс горения. Кроме этого, вода при высоких температурах диссоциирует на ионы H^+ и OH^- . Ион OH^- является сильным окислителем и снижает химический недожог. Ион H^+ активнее атома азота и первым вступает в реакцию со свободными атомами и молекулами кислорода, способствуя этим уменьшению генерации оксидов азота.

Однако увеличение доли паров в продуктах сгорания увеличивает их теплоемкость и увеличивает потери с теплом уходящих газов, а также увеличивает опасность низкотемпературной коррозии.

Какой из этих процессов будет превалировать, зависит от многих факторов, поэтому в различных экспериментах получаются иногда разные результаты и различное влияние на образование оксидов азота. Из-за явления микровзрыва капель ВМЭ и интенсификации процесса горения мазута концентрация оксидов азота может увеличиться, а из-за расхолаживания зоны активного горения – уменьшиться.

Принципиальная схема кавитатора с расходом мазута (ВМЭ) до 450 т/ч и давлением до 1 МПа представлена на рис. 9.5. Проточная часть кавитатора имеет девять плоских параллельных профилированных каналов, образованных плоскими пластинами (сверху и снизу) и профилирующими вставками (по бокам). Высота канала 10 мм, ширина в узком месте 130 мм. В каждом канале установлено два ряда турбулизирующих цилиндрических вставок. Турбулизирующие цилиндры могут быть выполнены гладкими или с насечкой на боковой поверхности для усиления эффекта кавитации. Принцип действия кавитатора основан на явлении возникновения зон кавитации (каверн) за цилиндрическими вставками из-за резкого местного падения давления и последующего «схлопывания» каверн.

В нескольких рабочих каналах конструкцией кавитатора предусмотрена установка регулирующих стержней, позволяющих частично или полностью перекрывать сечение канала и тем самым изменять общее проходное сечение кавитатора. Изменение скоростей движения потока среды позволяет при определенном расходе мазута (ВМЭ) через кавитатор изменять дисперсность получаемой ВМЭ. Регулирование проходного сечения кавитатора позволяет в ходе экспериментов выявить подходящие характеристики ВМЭ для эксплуатации конкретного котла при определенном режиме сжигания топлива и решить экологическую задачу одновременно по оксидам азота и бенз(а)пирену. Следует отметить, что прибор регулирует качество ВМЭ в безостановочном режиме работы оборудования ТЭС, независимо от параметров и режимов эксплуатации.

В кавитаторе предусмотрен специальный входной штуцер, через который в поток исходного мазута подается добавочная влага (чистая вода или сточные воды, загрязненные нефтепродуктами). На втором переходе так же предусмотрен еще один выходной штуцер, на случай вывода в ремонт прибора и проведения его очистки паром или горячей водой. Вес кавитатора составляет 80 кг, что не требует установки под ним специальных опорных конструкций. Одна из положительных конструктивных особенностей кавитатора – компактность (640 мм), не требующая больших прямых участков мазутопровода.

Наиболее полно преимущества данного кавитатора проявляются при использовании его в режиме ступенчатого сжигания ВМЭ [64]. В этом случае уменьшение выбросов оксидов азота происходит без увеличения выбросов бенз(а)пирена, а также при меньших концентрациях H_2S в районе топочных экранов, что снижает риск их высокотемпературной коррозии [65].

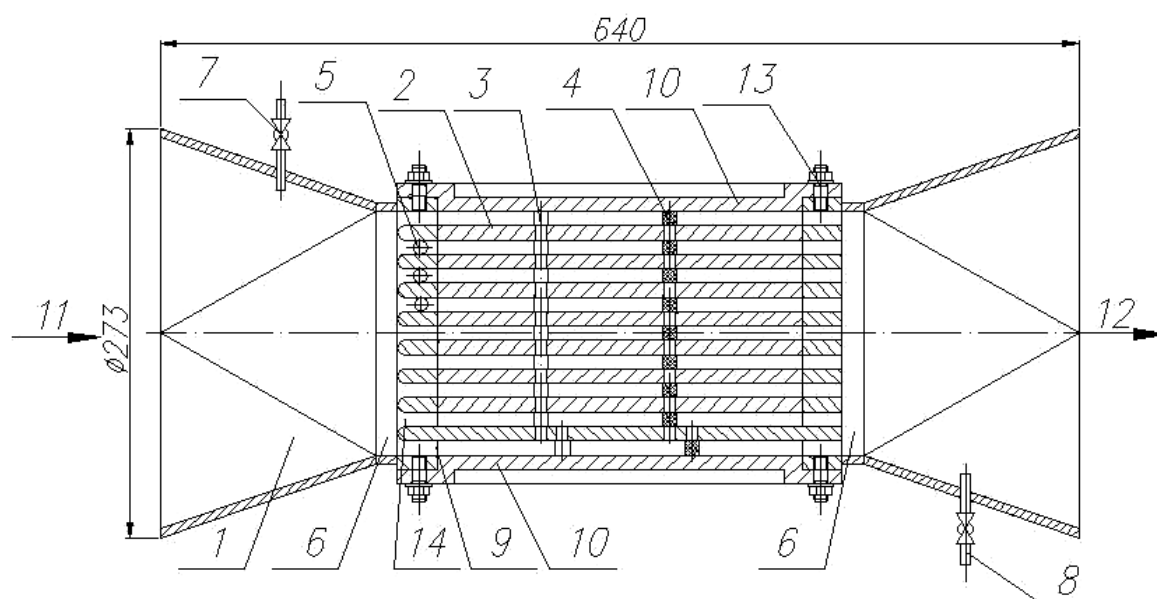


Рис. 9.5. Конструкция кавитатора МЭИ-ТЭЦ-23: 1 – канал проточной части кавитатора; 2 – пластина; 3 – турбулизирующие цилиндры (первого ряда); 4 – турбулизирующие цилиндры с насечкой (второго ряда); 5 – регулирующие стержни; 6 – переход; 7 – штуцер для ввода добавочной влаги; 8 – штуцер для продувки и очистки кавитатора; 9 – корпус; 10 – крышка; 11 – вход мазута; 12 – выход ВМЭ; 13 – крепежные детали; 14 – профилирующие вставки

Контрольные вопросы

1. Расскажите принцип работы котла с кипящим слоем.
2. Сравните топку с факельным сжиганием топлива с топкой котла с кипящим слоем.
3. Раскройте понятия «стационарный кипящий слой» и «циркулирующий кипящий слой».
4. Расскажите, какие преимущества и недостатки у котлов с кипящим слоем.
5. Поясните, что такое циркулирующий кипящий слой под давлением.

6. Как влияет рециркуляция дымовых газов на выброс бенз(а)-пирена?
7. Опишите процесс сжигания твердого топлива в расплаве.
8. Раскройте понятие «водомазутная эмульсия».
9. Когда применение водомазутной эмульсии дает наибольший эффект?
10. Как готовится водомазутная эмульсия?
11. Опишите особенности горения водомазутной эмульсии.
12. Какое влияние водомазутная эмульсия оказывает на генерацию оксида азота и на генерацию бенз(а)пирена?
13. Объясните устройство кавитатора.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. «Перенаселение планеты как экологическая проблема». – Текст : электронный // Зеленая Россия : сайт. – 2021. – URL: <http://greenrussia.ru/news/ekologiya/4543-perenaselenie-planety-kak-ekologicheskaya-problema.html> (дата обращения: 08.03.2021).
2. Уилсон, Т. С. Очистка воздуха // Здоровье и окружающая среда / перевод с английского А. С. Долецкого ; предисловие Г. И. Сидоренко ; под редакцией Дж. Ленихена, У. Флетчера. – Текст : электронный. – URL: <http://ecologylib.ru/books/item/f00/s00/z0000029/st009.shtml> (дата обращения: 08.03.2021).
3. Руководство по гигиене атмосферного воздуха / под редакцией К. А. Буштуевой. – Москва : Медицина», 1976. – 416 с.
4. РД 52.04.212-86. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. Общесоюзный нормативный документ (ОНД-86): утвержден Председателем Госкомгидромета 4 августа 1986 года: введен в действие 1 января 1987 года. – Ленинград : Госкомгидромет, 1987. 92 с.
5. Об охране окружающей среды: Федеральный закон №7-ФЗ: принят Государственной Думой 20 декабря 2001 года : одобрен Советом Федерации 26 декабря 2001 года. – Текст : электронный // СПС КонсультантПлюс (дата обращения: 16.03.2021).
6. Об охране атмосферного воздуха : Федеральный закон № 96-ФЗ : принят Государственной думой 2 апреля 1999 года : одобрен Советом Федерации 22 апреля 1999 года. – Текст : электронный // СПС КонсультантПлюс (дата обращения: 16.03.2021).
7. Градостроительный кодекс Российской Федерации : Федеральный закон № 190-ФЗ: принят Государственной думой 22 декабря 2004 года: одобрен Советом Федерации 24 декабря 2004 года. – Текст : электронный // СПС КонсультантПлюс (дата обращения: 16.03.2021).
8. Кодекс Российской федерации об административных правонарушениях № 195-ФЗ : принят Государственной думой 20 декабря 2001 года : одобрен Советом Федерации 26 декабря 2001 года // СПС КонсультантПлюс (дата обращения: 16.03.2021). – Текст : непосредственный.
9. Налоговый кодекс Российской Федерации : в 2 частях : текст с изменениями и дополнениями на 1 марта 2021 года. – Текст : электронный // СПС КонсультантПлюс (дата обращения: 16.03.2021).
Часть первая : принята Государственной думой 16 июля 1998 года : одобрена Советом Федерации 17 июля 1998 года.
Часть вторая: принята Государственной думой 19 июля 2000 года : одобрена Советом Федерации 26 июля 2000 года.

10. Комплексный контроль и предотвращение загрязнений окружающей среды : справочник по наилучшим доступным технологиям для крупных топливосжигающих установок / перевод с английского ОАО «ЭНИН» по заказу НП «ИНВЭЛ». – Москва, 2009. – 649 с.

11. ИТС 38-2017. Сжигание топлива на крупных установках в целях производства энергии: утвержден Росстандартом 22 декабря 2017 года. – Москва : Бюро НДТ, 2017. – 280 с.

12. Временная методика определения предотвращенного экологического ущерба: утверждена Госкомитетом РФ по охране окружающей среды 9 марта 1999 года. – Текст: электронный. – Москва, 1999. – 41 с. – URL:<https://www.waste.ru/uploads/library/usherb.pdf> (дата обращения : 16.03.2021).

13. ГОСТ Р 56167-2014. Выбросы загрязняющих веществ в атмосферу. Метод расчета ущерба от промышленного предприятия объектам окружающей среды : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 14 октября 2014 г. № 1325-ст : введен впервые : дата введения 2015-07-01 / разработан ОАО «НИИ охраны атмосферного воздуха». – Москва : Стандартиформ, 2019. – 10 с.

14. О ставках платы за негативное воздействие на окружающую среду и дополнительных коэффициентах : постановление Правительства РФ от 13 сентября 2016 г. № 913. – Текст : электронный // ЭПС «Система Гарант» (дата обращения: 16.03.2021).

15. Экономика энергетики : учебное пособие для вузов / Н. Д. Рогалев, А. Г. Зубков, И. В. Мастерова [и др.] ; под редакцией Н. Д. Рогалева. – Москва : Издательство МЭИ, 2005. – 288 с.

16. Об утверждении перечня объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду, относящихся к I категории, вклад которых в суммарные выбросы, сбросы загрязняющих веществ в Российской Федерации составляет не менее чем 60 процентов : приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 18 апреля 2018 г. № 154. – Текст : электронный // ЭПС «Система Гарант» (дата обращения: 16.03.2021).

17. О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года : указ Президента Российской Федерации № 204 от 7 мая 2018 года. – Москва : Кремль. – URL: <http://kremlin.ru/acts/bank/43027> (дата обращения: 16.03.2021). – Текст : электронный.

18. Допустимые выбросы радиоактивных и химических веществ в атмосферу / Е. Н. Теверовский, Н. Е. Артемова, А. А. Бондарев [и др.] ; под редакцией Е. Н. Теверовского, И. А. Терновского. – Москва : Энергоатомиздат, 1985. – 216 с.

19. «Нормативы ПДК и их изменения». – Текст : электронный // Экодело. – URL: https://ecodelo.org/rossiyskaya_federaciya/44771normativy_pdk_i_ih_izmeneniya (дата обращения: 21.03.2021).

20. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания : утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 28 января 2021 года № 2. – Текст : электронный // ЭПС «Система Гарант» (дата обращения: 16.03.2021).

21. Чичерин, С. С. Развитие методологии мониторинга атмосферы в РФ и международный опыт : презентация : материалы научно-практической конференции «Загрязнение атмосферы городов» 1–3 октября 2013 г. / С. С. Чичерин. – Текст : электронный. – URL: http://voeikovmgo.ru/download/Conferences/Conference2013101_3/Presentations/2013101/3_chicherin.pdf (дата обращения: 21.03.2021).

22. Николайкин, Н. И. Экология : учебник для вузов / Н. И. Николайкин, Н. Е. Николайкина, О. П. Мелехова. – Москва: Дрофа, 2003. – 624 с.

23. Методическое пособие по расчету, нормированию и контролю выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух. – Текст : электронный // ОАО НИИ «Атмосфера». – Санкт-Петербург, 2012. – 224 с. – URL: <https://www.meganorm.ru/Data2/1/4293792/4293792228.pdf> (дата обращения: 22.03.2021).

24. РД 34.02.305-98. Методика определения валовых выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от котельных установок ТЭС : утвержден Департаментом стратегии развития и научно-технической политики РАО «ЕЭС России» 21 января 1998 года : дата введения 1998-01-01 : взамен РД 34.02.305-90 / разработан АООТ «ВТИ». – Москва : ПМБ ВТИ, 1998. – 38 с.

25. СО 153-34.02.316-2003 (РД 153-34.1-02.316-2003). Методика расчета выбросов бенз(а)пирена в атмосферу паровыми котлами электростанций : утвержден приказом Министерства энергетики Российской Федерации от 30 июня 2003 года № 286 : взамен РД 153-34.1-02.316-99 : дата введения 2003-07-01 / разработан ОАО ВТИ. – Москва, 2007. – 9 с.

26. РД 153-34.0-02.318-2001. Методические указания по расчету валового выброса двуокиси углерода в атмосферу из котлов тепловых электростанций и котельных: утвержден Департаментом научно-

технической политики и развития РАО «ЕЭС России» 17 февраля 2001 года : введен впервые : дата введения 2001-12-01 /ОАО «Фирма ОРГРЭС»; ОАО «ЭНИН им. Г. М. Кржижановского». – Москва : СПО ОРГРЭС, 2001. – 7 с.

27. Тепловой расчет котлов. Нормативный метод // РАО «ЕЭС»; ОАО «ВТИ»; НПО ЦКТИ. – 3-е изд., перераб. и доп. – Санкт-Петербург, 1998. – 261 с.

28. Энергетическое топливо СССР : Справочник / редактор В. С. Вдовченко [и др.]. – Москва : Энергоатомиздат, 1991. – 183 с.

29. Вукалович, М. П. Термодинамика: учебное пособие для вузов / М. П. Вукалович, И. И. Новиков. – Москва : Машиностроение, 1972. – 670 с.

30. Френкель, Н. З. Гидравлика : учебное пособие для вузов / Н. З. Френкель. – Москва : Госэнергоиздат, 1956. – 456 с.

31. Берлянд, М. Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы / М. Е. Берлянд. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1975. – 446 с.

32. Об утверждении методов расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе : приказ Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации 6 июня 2017 года № 273. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/456074826> (дата обращения: 16.03.2021). – Текст : электронный.

33. Шлихтинг, Г. Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг ; перевод с немецкого Г. А. Вольперта. – Москва: Наука, 1974. – 711 с.

34. Абрамович, Г. Н. Теория турбулентных струй / Г. Н. Абрамович. – Москва: Государственное издательство физико-математической литературы. 1960. – 715 с.

35. Талиев, В. Н. Аэродинамика вентиляции / В. Н. Талиев. – Москва: Стройиздат, 1979. – 295 с.

36. Рихтер, Л. А., Причины и условия возникновения процесса самоокутывания дымовых труб / Л. А. Рихтер, Е. И. Гаврилов, В. Б. Прохоров // Теплоэнергетика. – 1980. – № 11. – С. 15–18.

37. СП 131.13330.2020. СНиП 23-01-99* Строительная климатология : приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 24 декабря 2020 г. № 859/пр : дата введения 2021-06-25. – Москва : Минстрой России, 2020. – 153 с. – URL: <https://minstroyrf.gov.ru/upload/iblock/82b/SP-131.pdf> (дата обращения: 27.06.2021). – Текст : электронный.

38. Волков, Э. П. Контроль загазованности атмосферы выбросами ТЭС / Э. П. Волков. – Москва : Энергоатомиздат, 1986. – 256 с.

39. Бызова, Н. Л. Рассеяние примеси в пограничном слое атмосферы / Н. Л. Бызова. – Москва : Гидрометеиздат, 1974. – 191 с.
40. Грибков, А. М. Загрязнение приземного слоя воздуха тепловой электростанцией в процессе эксплуатации: учебное пособие / А. М. Грибков, Д. С. Тюклин. – Казань : Казанский государственный энергетический университет, 2011. – 120 с.
41. Бызова, Н. Л. Методическое пособие по расчету рассеивания примесей в пограничном слое атмосферы по метеорологическим данным / Н. Л. Бызова. – Москва : Гидрометеиздат, 1973. – 47 с.
42. Монин, С. А. Статистическая гидромеханика. В 2 частях. Часть 1. Механика турбулентности / С. А. Монин, А. М. Яглом. – Москва : Наука, 1965. – 641 с.
43. Рихтер, Л. А. Тепловые электрические станции и защита атмосферы / Л. А. Рихтер. – Москва : Энергия, 1975. – 312 с.
44. Рихтер, Л. А. Охрана водного и воздушного бассейнов от выбросов тепловых электростанций: учебник для вузов / Л. А. Рихтер, Э. П. Волков, В. П. Покровский ; под редакцией П. С. Непорожного. – Москва : Энергоиздат, 1981. – 296 с.
45. Рихтер, Л. А. Вспомогательные установки, оборудование и трубопроводы тепловых электростанций : учебное пособие / Л. А. Рихтер, А. М. Князев; под редакцией В. Е. Куликова. – Москва : Издательство МЭИ, 1972. – 107 с.
46. ГОСТ Р 55173-2012. Установки котельные. Общие технические требования: национальный стандарт Российской Федерации : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 23 ноября 2012 года № 1142-ст : введен впервые : дата введения 2014-07-01 / разработан ОАО «ЭМАльянс». – URL:<http://docs.cntd.ru/document/1200103141> // (дата обращения: 16.03.2021). – Текст : электронный.
47. Annex IV. Emission limit values for SO₂. – Текст : электронный // Directive 2001/80/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2001 on the limitation of emissions of certain pollutants into the air from large combustion plants. – URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32001L0080&from=EN> (дата обращения: 16.03.2021).
48. Упрощенная мокро-сухая сероочистка дымовых газов ТЭС / И. Н. Шмиголь, Ч. Седман, У. Маршан, В. Ф. Солдатенко // Теплоэнергетика. – 1996. – № 8. – С. 65–66.

49. Абрамов, А. И. Повышение экологической безопасности ТЭС1 : учебное пособие / А. И. Абрамов, Д. П. Елизаров, А. Н. Ремезов [и др.]; под редакцией А. С. Седлова. – Москва : МЭИ, 2001. – 378 с.
50. Котлер, В. Р. Оксиды азота в дымовых газах котлов / В. Р. Котлер. – Москва : Энергоатомиздат, 1987. – 141с.
51. Снижение выбросов оксидов азота с помощью регулируемого остаточного химического недожога / В. И. Барышев, Б. С. Белосельский, Л. А. Эенькевич, Л. И. Шпилевская // Теплоэнергетика. – 1985. – № 10. – С. 58–60.
52. Росляков, П. В. Технологические мероприятия по снижению вредных выбросов ТЭС в атмосферу / П. В. Росляков, Л. Е. Егорова, И. Л. Ионкин. – Москва : Издательство МЭИ, 2001. – 52 с.
53. Грибков, А. М. Снижение выбросов оксидов азота котлами ПЭО Татэнерго / А. М. Грибков, Ю. В. Щелоков, А. В. Чадаев // Электрические станции. – 2001. – № 4. – С. 13–18.
54. Грибков, А. М. Нестехиометрическое сжигание топлива как способ повышения надежности экранов котла / А. М. Грибков // Эффективные энергетические системы и новые технологии : материалы I Международной научно-практической конференции. – Казань : Казанский государственный технический университет, 2002. – С. 211–215.
55. Грибков, А. М. Внедрение системы определения выбросов оксидов азота предприятиями ОАО «Татаэнерго» на основе экологических характеристик котлов / А. М. Грибков, Е. И. Игонин // Вестник Татарстанского отделения Российской экологической академии. – 2003. – № 3. – С. 39–42.
56. Грибков, А. М. Двухпараметрические экологические характеристики котлов по выбросам NO_x / А. М. Грибков, Е. И. Игонин. // Энергоресурсоэффективность и энергосбережение в Республике Татарстан : сборник докладов VII Международного симпозиума. – Казань, 2006. – С. 513–518.
57. Дуплева, С. Г. Совместное сжигание нескольких видов топлива / С. Г. Дуплева // Промышленная энергетика. – 1977. – № 4. – С. 54–55.
58. Патент № 2042881 Российская Федерация, МПК F 23 C11/00. Способ уменьшения образования оксидов азота в процессе сжигания жидкого топлива : № 5057892/06 : заявлено 06.08.1992 : опубликовано 27.08.1995 / Грибков А. М., Чадаев А. В., Замальдинов Х. А. – 4 с.
59. Сокращение выброса окислов азота путем зонального впрыска влаги в топку котлов / В. П. Васильев, Л. М. Цирульников, Ш. А. Абдуллаев [и др.] // Электрические станции. – 1986. – № 2. – С. 38–43.

60. Подавление оксидов азота дозированным впрыском воды в зону горения топки котла / В. И. Кормилицын, М. Г. Лысков, В. М. Новиков, Н. Ю. Кудрявцев // Теплоэнергетика. – 1990. – № 10. – С. 74–77.

61. Результаты комплексных испытаний котла ТГМП-314 ТЭЦ-23 АО Мосэнерго после реконструкции / Ю. П. Енякин, Н. А. Зройчиков, Б. Н. Глускер [и др.] // Электрические станции. – 2002. – № 2. – С. 10–16.

62. Современные природоохранные технологии в энергетике : информационный сборник / В. В. Абрамов, В. С. Агабабов, С. Н. Аничков [и др.] ; под общей редакцией В. Я. Путилова. – Москва : Издательский дом МЭИ, 2007. – 388 с.

63. Маневренность и экологичность котлов с газификацией угля в шлаковом расплаве / А. А. Мадоян, А. К. Галкин, А. П. Берсенов [и др.] // Теплоэнергетика. – 1999. – № 11. – С. 26–30.

64. Исследование и опыт применения водомазутных эмульсий на энергетических котлах ТГМП-314 и ТГМ-96 / Н. А. Зройчиков, М. Г. Лысков, А. Б. Булгаков, Е. А. Морозова // Теплоэнергетика. – 2006. – № 6. – С. 31–35.

65. Морозова, Е. А. Разработка и исследование технологии эмульгирования мазута с целью оптимизации режимов горения в топке для повышения надежности, экономичности и экологической безопасности энергетических котлов: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Морозова Екатерина Александровна; Московский энергетический институт. – Москва, 2008. – 21 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. ЗАКОНОДАТЕЛЬСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ОБ ОХРАНЕ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ	8
1.1. Основные тенденции в изменении законодательства Российской Федерации об охране окружающей среды	8
1.1.1. Обзор изменений Федерального закона «Об охране окру- жающей среды»	8
1.1.2. Обзор изменений Федерального закона «Об охране атмос- ферного воздуха»	21
1.1.3. Обзор изменений в Градостроительном кодексе Российской Федерации	24
1.1.4. Обзор изменений в Кодексе Российской Федерации об административных правонарушениях	25
1.1.5. Обзор изменений в Налоговом кодексе Российской Федерации	25
1.2. Понятие о наилучшей доступной технологии (НДТ)	26
1.2.1. Наилучшая доступная технология снижения выбросов твердых частиц при сжигании твердого топлива	27
1.2.2. Наилучшая доступная технология снижения выбросов оксидов азота NO _x при сжигании твердого топлива	28
1.2.3. Наилучшая доступная технология снижения выбросов оксидов серы SO _x при сжигании твердого топлива	28
1.2.4. Наилучшая доступная технология снижения выбросов оксидов азота NO _x при сжигании жидкого топлива	29
1.2.5. Наилучшая доступная технология снижения выбросов оксидов серы SO _x при сжигании жидкого топлива	29
1.2.6. Внедрение наилучших доступных технологий	29
2. ВРЕДНЫЕ ВЫБРОСЫ ТЭС	35
2.1. Предельно допустимые концентрации вредных выбросов	35
2.2. Приборный контроль выбросов	39
2.3. Расчетные методы определения выбросов	42
2.3.1. Расчет выбросов оксидов азота	42
2.3.2. Расчет выбросов оксидов серы	45
2.3.3. Расчет выбросов твердых частиц топлива	46
2.3.4. Расчет выбросов мазутной золы в пересчете на ванадий	47
2.3.5. Расчет выбросов бенз(а)пирена в атмосферу паровыми котлами электростанций	48
2.3.6. Расчет выброса двуокси углерода	51

3. ТРАЕКТОРИЯ ДЫМОВОГО ФАКЕЛА.....	53
3.1. Формирование дымового факела	53
3.2. Влияние метеорологических условий на распространение дымового факела	55
3.2.1. Атмосферное давление.....	55
3.2.2. Профиль скорости ветра в атмосфере.....	58
3.2.3. Температурный градиент в атмосфере	60
3.2.4. Определение величины турбулентности атмосферы	66
3.3. Траектория и подъем дымового факела.....	67
3.3.1. Эффективная высота дымовой трубы.....	67
3.3.2. Подъем дымового факела при отсутствии ветра	70
3.4. Траектория дымового факела при малых скоростях ветра на начальном участке.....	81
3.5. Траектория дымового факела при повышенных скоростях ветра	82
3.6. Траектория дымового факела при высоких скоростях ветра	91
4. РАСЧЕТ ПРИЗЕМНЫХ КОНЦЕНТРАЦИЙ	103
4.1. Расчет загрязнения атмосферы выбросами одиночного источника при неблагоприятных метеорологических условиях	103
4.2. Расчет загрязнения атмосферы выбросами одиночного источника при текущих метеорологических условиях.....	108
5. УМЕНЬШЕНИЕ ВЫБРОСОВ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ.....	115
5.1. Характеристики летучей золы твердого топлива	115
5.2. Основные процессы при золоулавливании	117
5.3. Сухие инерционные золоуловители.....	121
5.4. Мокрые инерционные золоуловители	123
5.5. Электрофилтры.....	126
5.6. Тканевые пылеуловители	136
6. УМЕНЬШЕНИЕ ВЫБРОСОВ ОКСИДОВ СЕРЫ.....	141
6.1. Определение необходимой степени очистки	141
6.2. Мероприятия, которые могут быть внедрены на действующих котлах.....	146
6.2.1. Добавка известняка в уголь перед размолот	146
6.2.2. Уменьшение выбросов оксидов серы при сжигании мазута....	148
6.2.3. Подача известняковой пыли в топку	149
6.2.4. Подача известковой пыли в газоходы.....	150
6.2.5. Подача раствора соды в скруббер Вентури.....	151
6.3. Сероочистка уходящих газов в мировой практике.....	153
6.3.1. Мокрая известняковая технология.....	153

6.3.2. Мокрая известковая технология	156
6.3.3. Аммиачно-сульфатная технология.....	157
6.3.4. Аммиачно-циклическая технология.....	159
6.3.5. Магnezитовая циклическая технология	160
6.3.6. Натрий сульфит-бисульфитная технология	161
6.3.7. Сухие скрубберы	161
6.3.8. Перспективные методы сухой сероочистки	165
7. УМЕНЬШЕНИЕ ВЫБРОСОВ ОКСИДОВ АЗОТА.....	168
7.1. Образование оксидов азота	168
7.2. Первичные мероприятия по уменьшению выбросов NO _x	170
7.2.1. Предельно низкие избытки воздуха	170
7.2.2. Нестехиометрическое сжигание топлива	172
7.2.3. Сжигание газа и мазута в разных горелках	176
7.2.4. Сжигание газа и мазута в одной горелке	177
7.2.5. Снижение температуры горячего воздуха.....	178
7.2.6. Рециркуляция дымовых газов	178
7.2.7. Впрыск воды или пара в зону активного горения	180
7.2.8. Малотоксичные горелки.....	180
7.3. Вторичные мероприятия по уменьшению выбросов NO _x	182
7.3.1. Селективное каталитическое восстановление	182
7.3.2. Селективное некаталитическое восстановление	187
8. УМЕНЬШЕНИЕ ВЫБРОСОВ БЕНЗ(А)ПИРЕНА И СОЕДИНЕНИЙ ВАНАДИЯ	190
9. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СЖИГАНИЯ ТОПЛИВА	197
9.1. Сжигание твердого топлива в котлах с кипящим слоем.....	197
9.2. Сжигание твердого топлива в расплаве	202
9.3. Сжигание водомазутной эмульсии.....	204
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	209

Учебное издание

Грибков Александр Михайлович

**НАИЛУЧШИЕ ДОСТУПНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТОПЛИВА НА ТЭС**

Учебное пособие

Кафедра атомных и тепловых электрических станций КГЭУ

Редактор *И. В. Краснова*
Компьютерная верстка *Т. И. Лунченковой*

Подписано в печать 09.03.2022.
Формат 60×84/16. Усл. печ. л. 12,73. Уч.-изд. л. 8,60.
Заказ № 399/эл.

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