Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого»

Кафедра «Промышленная теплоэнергетика и экология»

Н. В. Овсянник, Н. В. Широглазова

ЭКОЛОГИЯ ЭНЕРГЕТИКИ

КУРС ЛЕКЦИЙ

**по одноименной дисциплине
для студентов специальностей 1-43 01 05
«Промышленная теплоэнергетика»
дневной и заочной форм обучения
и 1-43 01 07 «Техническая эксплуатация
энергооборудования организаций»
дневной формы обучения**

Электронный аналог печатного издания

Гомель 2010

Библиотека ГГТУ им. П.О. Сухого

УДК 502.3:621.3(075.8)
ББК 20.1+31я73
О-34

Рекомендовано к изданию научно-методическим советом
к изданию научно-методическим советом
энергетического факультета
ГГТУ им. П. О. Сухого
(*протокол № 6 от 09.02.2010 г.*)

Рецензент: зав. каф. «Машины и технология литейного производства»
ГГТУ им. П. О. Сухого канд. техн. наук, доц. *Л. Е. Ровин*

Овсянник, Н. В.
О-34 Экология энергетики : курс лекций по одноим. дисциплине для студентов специальностей 1-43 01 05 «Промышленная теплоэнергетика» днев. и заоч. форм обучения и 1-43 01 07 «Техническая эксплуатация энергооборудования организаций» днев. формы обучения / Н. В. Овсянник, Н. В. Широглазова. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2010. – 100 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: http://lib.gstu.local. – Загл. с титул. экрана.

ISBN 978-985-420-961-6.

Данный курс лекций позволяет студентам ознакомиться с основными видами воздействия вредных выбросов и сбросов тепловых электрических станций на окружающую среду, со способами уменьшения негативного влияния.

Для студентов специальности 1-43 01 05 «Промышленная теплоэнергетика» дневной и заочной форм обучения и 1-43 01 07 «Техническая эксплуатация энергооборудования организаций» дневной формы обучения.

УДК 502.3:621.3(075.8)
ББК 20.1+31я73

ISBN 978-985-420-961-6

© Овсянник Н. В., Широглазова Н. В., 2010
© Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», 2010

Библиотека ГГТУ им. П.О.Сухого

ВВЕДЕНИЕ

Закончившийся XX в. характеризуется колоссальным ростом потребления человечеством энергии в различных ее видах. Эта тенденция сохраняется и в наступившем XXI в.

Основным источником энергии на Земле является Солнце. В предыдущие столетия своей истории человечество ограничивалось использованием возобновляемых источников энергии в виде механической энергии ветра, напора воды, а для приготовления пищи и обогрева – связанную химическую энергию Солнца (дрова).

В XX в. этих источников энергии на Земле стало недостаточно для покрытия все возрастающих потребностей населения Земли, которое также стремительно растет. Развились механический транспорт и электропривод. Почти всюду ручной труд был заменен механизированным. Появились производства, связанные с большим потреблением электрической и тепловой энергии. Распространились электрическая и газовая сварка металла, использование кислорода в технологических процессах. Возникло производство новых материалов и тканей, пластических масс, потребовавшее дополнительного расхода энергии. Увеличилось потребление электрической энергии в связи с автоматизацией производства и внедрением управляющей и вычислительной техники. Большой расход энергии связан с космической техникой.

Развитие центрального отопления, горячего водоснабжения, новых способов отопления и кондиционирования привело к росту потребления тепловой и электрической энергии. Возросло потребление электроэнергии в быту (наряду с электрическим освещением появились холодильники, стиральные машины, телевизоры, пылесосы). В результате всего этого возник колоссальный рост потребления всех видов энергии в высокоразвитых странах. Возобновляемых источников энергии явно недостаточно для покрытия этого расхода.

Использование для энергетики ядерной энергии в виде рудных запасов урана и тория связано с рядом экологических ограничений и особенно – с проблемой захоронения опасных для жизни радиоактивных отходов.

Библиотека ГГТУ им.П.О.Сухого

Получение электроэнергии непосредственно от Солнца связано с экономическими трудностями, невысокой плотностью потока этой энергии, влиянием погодных условий, временем суток и года, географическим расположением солнечных электростанций.

Все это заставляет для получения энергии во все возрастающем масштабе использовать запасы химически связанной энергии ископаемых топлив (уголь, нефть, природный газ), накопленных Землей за миллионы лет.

Эти запасы ископаемых топлив можно использовать как путем их непосредственного сжигания в топках котлов, так и после их переработки в высококачественное топливо (бензин, керосин, кокс, искусственный газ).

Основным потребителем ископаемых топлив, а также отходов их переработки является теплоэнергетика.

Использование в теплоэнергетике во все возрастающем объеме ископаемых топлив привело к серьезной проблеме, связанной с влиянием энергетики на окружающую среду и на условия жизни человечества. К этой проблеме энергетика вплотную приблизилась к концу XX в., и она становится решающей в XXI в. как для будущего энергетики, так и для человечества. Если эта проблема не будет решена должным образом, само существование жизни на Земле станет проблематичным. Одним из направлений в решении данной проблемы является создание экологически безопасных тепловых электростанций.

Библиотека ГГТУ им. П.О. Сухого

Тема 1. ЭНЕРГЕТИКА И ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА

1.1. Воздействие тепловых электрических станций на окружающую среду и человека

1.2. Лимиты на природопользование

1.3. Влияние вредных выбросов тепловых электрических станций на природу и человека

1.1. Воздействие тепловых электрических станций на окружающую среду и человека

Одним из основных источников экологически негативного воздействия на окружающую природную среду являются предприятия топливно-энергетического комплекса (ТЭК). Из отраслей ТЭК наибольшее воздействие оказывает энергетика.

Рабочая масса органического топлива состоит из углерода, водорода, кислорода, азота, серы, влаги и золы. В результате полного сгорания топлива образуются углекислый газ, водяные пары, оксиды серы (сернистый газ, серный ангидрид) и зола. Из перечисленных составляющих к числу токсичных относятся оксиды серы и зола. При высоких температурах в ядре факела топочных камер котлов большой мощности происходит частичное окисление азота воздуха и топлива с образованием оксидов азота (оксид и диоксид азота).

При неполном сгорании топлива в топках могут образовываться также оксид углерода CO, углеводороды CH_4, C_2H_6, а также канцерогенные вещества. Продукты неполного сгорания весьма вредны, однако при современной технике сжигания их образование можно исключить или свести к минимуму.

На рис. 1.1 показана типовая схема взаимодействия современной ТЭС со всеми сферами окружающей среды. Из рисунка видно, насколько велико и многообразно воздействие ТЭС на среду.

Наибольшую зольность имеют горючие сланцы и бурые угли, а также некоторые сорта каменных углей (например, экибастузские). Жидкое топливо имеет небольшую зольность; природный газ является беззольным топливом. Современные золоуловители благодаря высокой степени улавливания золы позволяют значительно снизить выбросы золы и довести их до весьма малых значений.

Библиотека ГГТУ им. П.О. Сухого

Для снижения выбросов оксидов азота разработаны и реализованы проекты низкотемпературного сжигания твердого топлива. Одной из особенностей низкотемпературного сжигания топлива является возможное образование диоксинов.

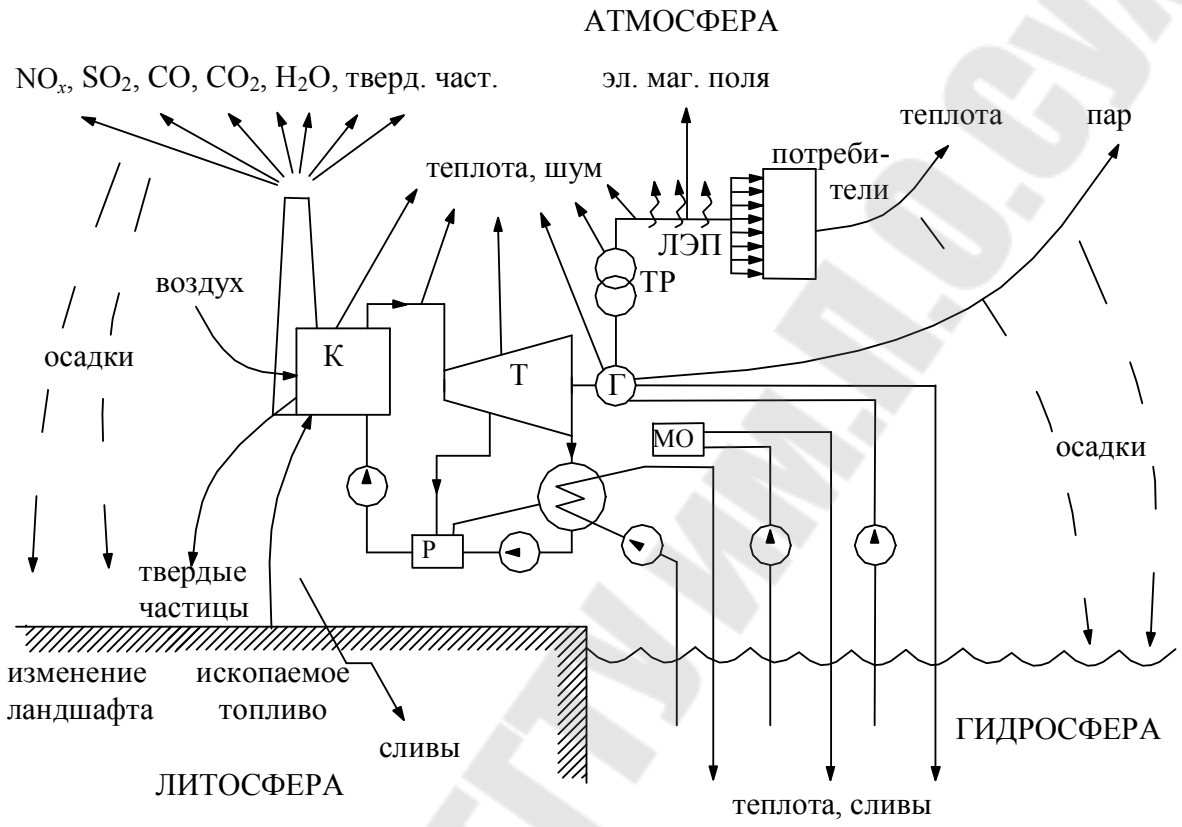


Рис. 1.1. Укрупненная схема взаимодействия ТЭС с окружающей средой (без учета биосферы): К – котел; Т – турбина; Г – электрогенератор; Р – система регенерации; МО – маслоохладители; ТР – трансформаторные подстанции; ЛЭП – линии электропередач

Серьезного внимания зслуживает проблема выбросов канцерогенных веществ, образующихся при неполном сгорании топлива. По своей распространенности и интенсивности воздействия из многих химических веществ этого типа наибольшее значение имеют полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) и наиболее активный из них – бенз(а)пирен. Максимальное количество бенз(а)пирена образуется при температуре 700–800 °С в условиях нехватки воздуха для полного сгорания топлива.

О масштабности этого воздействия можно судить по рис. 1.2, на котором показан материальный баланс топлива, твердых отходов и газовых выбросов угольной ТЭС 2400 МВт на антрацитовом штыбе

Библиотека ГГТУ им. П.О. Сухого

(высококалорийное топливо с низким выходом летучих) при часовом выбросе дымовых газов в объеме 8 млн м^3 с эффективностью золоулавливания 99 %.

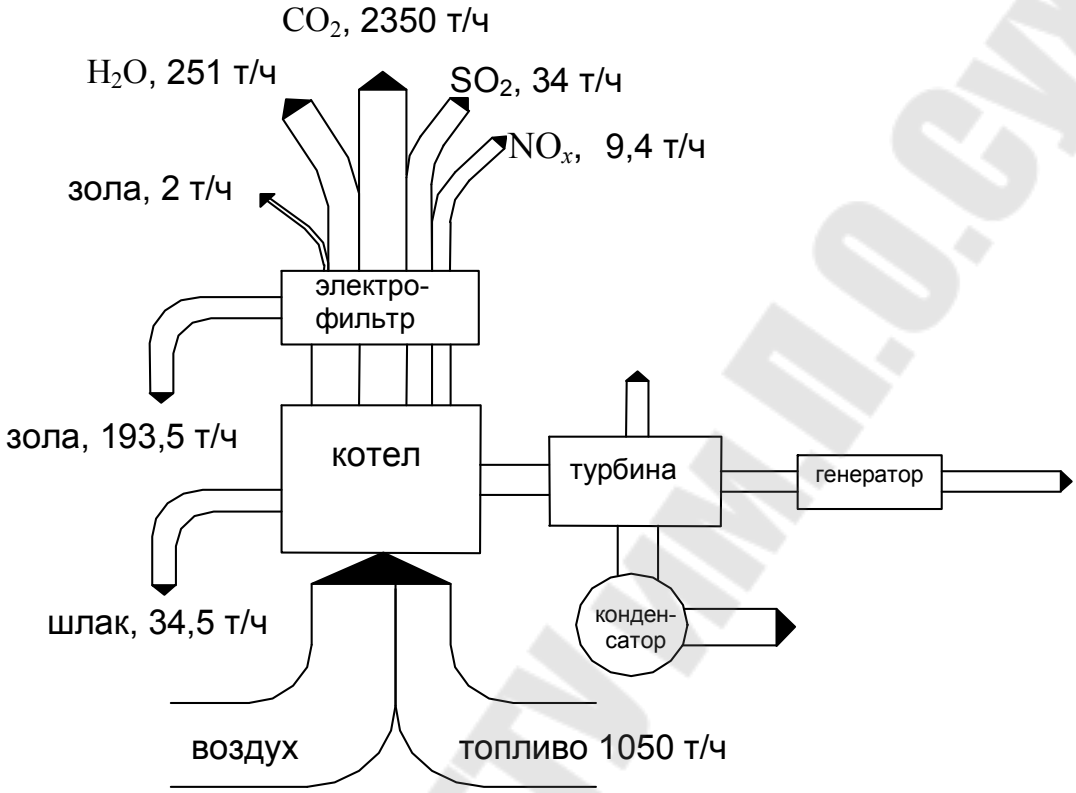


Рис. 1.2. Материальный баланс топлива, отходов и выбросов угольной тепловой электрической станции мощностью 2400 МВт на антрацитовом штыбе

Выбрасываемые в атмосферу из дымовых труб электростанций токсичные вещества оказывают вредное воздействие на весь комплекс живой природы, названный академиком В. И. Вернадским биосферой. Биосфера включает в себя прилегающий к поверхности Земли слой атмосферы, верхний слой почвы и верхние слои водных поверхностей.

В атмосферу попадают выбросы не только ТЭС, но и других промышленных предприятий, а также моторизированного транспорта и прочих источников загрязнения, связанных с деятельностью человека. Все эти выбросы можно назвать антропогенными в отличие от естественных, природных выбросов тех или иных веществ.

Роль предприятий различных отраслей промышленности (в том числе и ТЭС) в загрязнении атмосферы представлена в таблице 1.1. Как видно из представленных данных основную роль в загрязнении

Библиотека ГГТУ им. П.О. Сухого

атмосферы играют технологические процессы на базе органического топлива (ТЭС, металлургия, автомобильный транспорт).

Таблица 1.1

Загрязнение атмосферы различными отраслями промышленности

Отрасль	Поступление вредных веществ в атмосферу, %
ТЭС и котельные	27
Черная металлургия	17
Нефтедобыча и нефтехимия	16
Автомобильный транспорт	12
Цветная металлургия	10
Промышленность строительных материалов	5
Угольная	2,5
Химическая	1,5
Прочие	9
Всего	100

Естественное поступление в атмосферу некоторых загрязнителей по масштабам хотя и превосходит промышленное, все же именно промышленное имеет большое значение, так как создает загрязнение атмосферного воздуха в районах с высокой концентрацией населения. Промышленное загрязнение атмосферы на единицу площади Земли (в основном для населенных мест), как правило, превосходит загрязнение природными примесями.

Водоемы и водотоки представляют собой сложные экологические системы (экосистемы) существования биоценоза (сообщества живых организмов – животных и растений) в биотопе (в окружающей неживой природе – рельеф дна водоема, температура и состав примесей в воде). Водоемы не только служат сборниками воды, в которых показатели качества вод усредняются, но в них непрерывно протекают процессы изменения состава примесей – приближение к равновесию, которое может быть нарушено по многим причинам, но особенно в результате сброса в водоем загрязненных (сточных) вод.

Влияние загрязнителей на водоемы и водотоки подробнее будет рассмотрено в последующих темах.

Библиотека ГГТУ им. П.О. Сухого

1.2. Лимиты на природопользование

Уровень загрязнений сегодня столь высок, что возникает необходимость введения ограничений на человеческую деятельность по вредному воздействию на окружающую среду.

Лимитирование выбросов (сбросов) позволяет экономическими методами решать природоохранные задачи и стимулировать природопользователей к уменьшению вредного воздействия на окружающую среду и внедрению природоохранных технологий.

Природопользование в энергетике осуществляется в двух направлениях:

– изъятие природного вещества из природы (водопотребление);

– внесение антропогенного вещества в природу (выбросы загрязняющих веществ в атмосферу, сбросы в водоемы, размещение отходов производства и пр.).

Принято называть отвод загрязняющих веществ в водоемы *сбросами*, а в атмосферу – *выбросами*.

Предельно допустимые сбросы (выбросы) (ПДС, ПДВ) устанавливаются для каждого загрязняющего вещества, поступающего в окружающую среду.

Вода на ТЭЦ применяется для следующих целей:

– в качестве исходного сырья для получения добавочной воды основного контура электростанции;

– для конденсации отработавшего в паровых турбинах пара;

– для охлаждения оборудования;

– в качестве теплоносителя в тепловых сетях и системах горячего водоснабжения.

Для предприятий энергетики устанавливается лимит на пользование водными ресурсами. Он рассчитывается, исходя из норм водопотребления и водоотведения на единицу продукции и установленной мощности предприятия.

Нормы водопотребления используются для расчета лимитов потребления воды.

Эти нормы используются для расчета ПДС. *Предельно допустимые сбросы* (ПДС) – масса загрязняющего вещества в сточных водах, предельно допустимая к отведению со сточными водами в данном месте водного объекта в единицу времени, обеспечивающая нормативное качество воды в контрольном створе. ПДС рассчитываются как произведение предельно допустимой концентрации вещества (ПДК) в отводимых сточных водах и максимального часового расхода

Библиотека ГГТУ им. П.О. Сухого

сточных вод и устанавливаются с учетом фоновых концентраций загрязняющих веществ в воде водного объекта.

Вредные вещества поступают в атмосферу от ТЭС с дымовыми газами. В дымовых газах содержатся: оксиды, оксиды азота, летучая зола, содержащая в зависимости от вида топлива такие вредные вещества, как мышьяк, двуокись кремния, оксиды кальция, оксид ванадия, соли натрия, фтористые соединения. Влияние этих примесей на окружающую среду и на организм человека будет рассмотрено далее.

Предельно допустимые выбросы (ПДВ) – масса загрязняющего вещества в дымовых газах, которая при рассеивании в атмосфере обеспечивает концентрацию загрязняющего вещества в приземном слое воздуха, равную ПДК с учетом фонового загрязнения, обусловленного выбросами других предприятий данного района.

Если по существующей технологии сжигания (очистки) дымовых газов на ТЭС достичь ПДВ невозможно, то на определенный период, например, на время реконструкции устанавливается размер *временно согласованных выбросов* (ВСВ).

Учитывая огромный ущерб, причиняемый как окружающей среде, так и человеку, санитарным законодательством промышленно развитых стран установлены *предельно допустимые концентрации* (ПДК) веществ, загрязняющих воздух, водоемы и почву. Для каждой страны уровни ПДК свои. Единые международные стандарты до сегодняшнего дня не выработаны. Тем не менее, большинство стран (Германия, Великобритания, Дания, Голландия, Италия, Венгрия, Польша, Россия, Норвегия, Финляндия и т. д.) повсеместно стремятся к снижению вредных выбросов и ужесточению требований к предприятиям, загрязняющим окружающую среду.

ПДК – это норматив концентрации химического соединения, которая при ежедневном воздействии в течение длительного времени на организм человека не приводит к каким-либо патологическим изменениям в состоянии здоровья человека, а также не нарушает биологического оптимума для человека.

ПДК вредных веществ (т. е. веществ, которые при контакте с организмом человека могут привести к производственной травме, профессиональным заболеваниям или отклонениям в состоянии здоровья, либо химическое вещество, вызывающее нарушение в росте, развитии или состоянии здоровья организмов, в том числе в цепи поколений) устанавливаются в воздухе рабочей зоны, атмосферном воздухе и в воде водных объектов.

Библиотека ГГТУ им. П.О.Сухого

$ПДК_{Р.З}$ – предельно допустимая концентрация вредного вещества в воздухе рабочей зоны, мг/м^3.

$ПДК_{М.Р}$ – максимально разовая концентрация вредного вещества в воздухе населенных мест, мг/м^3.

$ПДК_{С.С}$ – среднесуточная предельно допустимая концентрация (т. е. концентрация загрязнителя в воздухе, не оказывающая на человека прямого или косвенного вредного воздействия при круглосуточном вдыхании), мг/м^3.

$ПДК_В$ – предельно допустимая концентрация вредных веществ в воде водоемов, мг/дм^3.

Кроме того, устанавливается ПДК химических веществ в почвах.

Большинство современных электростанций вынуждены работать в условиях фоновых загрязнений, создаваемых как другими предприятиями, так и собственно средой района функционирования. При этом *фоновым загрязнением* атмосферного воздуха считается загрязнение без учета выбросов рассматриваемого предприятия. Поэтому при изучении выбросов конкретной ТЭС следует учитывать фоновое загрязнение по каждому ингредиенту.

Для каждого из выбрасываемых веществ должно соблюдаться условие

$$\frac{c_i}{ПДК_i} \le 1,$$

где c_i – приземная концентрация i-го вещества, мг/м^3; $ПДК_i$ – значение ПДК i-го вредного вещества.

Совместное присутствие ряда вредных веществ в атмосферном воздухе может усиливать их токсичность. Такие вещества называют веществами однонаправленного действия и при их одновременном содержании в атмосфере должно выполняться условие

$$\frac{c_1}{ПДК_1} + \frac{c_2}{ПДК_2} + ... + \frac{c_n}{ПДК_n} \le 1,$$

где c_1, c_2 и c_n – концентрации вредных веществ однонаправленного действия, мг/м^3; $ПДК_1$, $ПДК_2$ и $ПДК_n$ – соответствующие значения ПДК этих веществ в атмосфере, мг/м^3.

По степени опасности (токсичности) различают четыре класса веществ: 1 – чрезвычайно опасные; 2 – опасные; 3 – умеренно опасные; 4 – относительно безопасные.

Библиотека ГГТУ им. П.О. Сухого

Значения ПДК и классы опасности некоторых веществ даны в таблице 1.2. В таблице показано влияние загрязнений атмосферного воздуха на состояние здоровья человека.

Таблица 1.2

Значение предельно допустимых концентраций вредных веществ в атмосфере воздуха

Загрязняющее вещество	**ПДК$_{М.Р}$, мг/м^3**	**ПДК$_{С.С}$, мг/м^3**	**Класс опасности**
Зола ТЭС	0,05	0,02	2
Сажа	0,15	0,05	3
Окислы серы	0,5	0,05	3
Диоксид азота	0,085	0,04	2
Оксид азота	0,6	0,06	3
Оксид углерода	5	3	4
Пентаксид ванадия	–	0,002	1
Бенз(а)пирен ($C_{20}H_{16}$)	–	0,1 мкг/100 м^3	1
Аммиак (NH_3)	0,2	0,04	4
Сероводород (H_2S)	0,008	–	2

Воздействие выбросов можно рассматривать в двух аспектах – для того или иного участка поверхности Земли в тот или иной отрезок времени (локальное воздействие) или общее воздействие на биосферу с учетом нарастающих темпов развития промышленности (глобальное воздействие). Глобальное воздействие определяется: изменением климата планеты, вызванного нарушением радиационного теплового баланса Земли в результате накопления продуктов сгорания органического топлива в атмосфере и усиления парникового эффекта; воздействием техногенных процессов на озоновый слой планеты; уменьшением дебита пресной воды; увеличенным водопотреблением на технологические нужды, т. е. загрязнением сбрасываемой воды, ее тепловое и микробиологическое воздействие на водоемы; уменьшение площади плодородных почв на планете; снижением рыбных запасов, запасов флоры и фауны в целом.

Библиотека ГГТУ им. П.О. Сухого

1.3. Влияние вредных выбросов тепловых электрических станций на природу и человека

Антропогенная деятельность оказывает существенное влияние на состав атмосферы, особенно в местах крупного сосредоточения промышленных объектов (в основном города с сильно развитой промышленной инфраструктурой) и транспорта. Здесь, в результате функционирования этих производств, выделяется большое количество CO, CO_2, NO_x, оксидов серы, формальдегидов, бенз(а)пирена, свинца и многих других (в зависимости от характера производства – практически все элементы таблицы Менделеева). При этом уровень вредных выбросов от антропогенной деятельности становится так велик, что приближается и превышает уровень глобальных естественных вредных компонентов, поступающих в атмосферу. Например, в последние годы имеет место не только абсолютный, но и относительный рост загрязнений атмосферного воздуха выхлопными газами автомобилей.

Состав сухого атмосферного воздуха у поверхности Земли представлен в таблице 1.3.

Таблица 1.3

Состав сухого атмосферного воздуха

Газы атмосферы	Содержание, %	Газы атмосферы	Содержание, %
Азот (N_2)	78,09	Криптон (Kr)	10^{-4}
Кислород (O_2)	20,95	Водород (H_2)	$5 \cdot 10^{-5}$
Аргон (Ar)	0,93	Полуоксид (N_2O)	$5 \cdot 10^{-5}$
Углекислота (CO_2)	0,03	Ксенон (Xe)	$8 \cdot 10^{-6}$
Неон (Ne)	$8 \cdot 10^{-3}$	Озон (O_3)	10^{-6}
Гелий (He)	$5{,}24 \cdot 10^{-3}$	Рений (Rn)	$6 \cdot 10^{-18}$

Количество водяного пара колеблется от 0,1 до 2,8 % в зависимости от сезона, климата и погоды.

Высокое содержание в атмосферном воздухе различных загрязнений неблагоприятно сказывается на всем комплексе живой природы. Отрицательное влияние загрязнений атмосферы выражается в ухудшении здоровья людей и животных, снижении урожайности сельскохозяйственных культур и продуктивности животных. Воздействию вредных веществ подвержены лесные угодья. Загрязнение ат-

Библиотека ГГТУ им. П.О.Сухого

мосферы влияет на коррозионные процессы строительных конструкций, ускорение износа зданий и оборудования.

Наибольшее неблагоприятное воздействие оказывают оксиды азота и серы: разрушается хлорофилл растений, повреждаются листья и хвоя. Наиболее чувствительными к SO_2 являются хвойные деревья. Диоксид серы вызывает посерение кончиков хвои и ее увядание. Пораженные участки приобретают бронзовую окраску. На листьях также появляются бледные пятна, которые затем приобретают бронзовый цвет и, в конце концов, опадают. Нарушение фотосинтеза и дыхания хвои начинается с концентрации SO_2, составляющей 0,23 мг/м^3. Хвоя высыхает за 2–3 года. При содержании SO_2 в воздухе 0,08–0,23 мг/м^3 происходит уменьшение интенсивности фотосинтеза и медленное увядание хвои. Лиственные деревья начинают поражаться при концентрации SO_2 от 0,5 до 1 мг/м^3. По данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) при концентрации диоксида серы в атмосферном воздухе на уровне 0,08 мг/м^3 ощущается дискомфорт у людей. При дальнейшем увеличении содержания диоксида серы или пыли до 0,25–0,5 мг/м^3 наблюдается ухудшение состояния больных с легочными заболеваниями. Постоянное нахождение людей в зоне с концентрациями более 0,5 мг/м^3 приводит к более частым заболеваниям и возрастанию смертности.

Поступающий в атмосферу триоксид серы (SO_3), взаимодействуя с влагой воздуха, образует серную кислоту, которая активно разрушает конструкции и оборудование.

Диоксид азота оказывает раздражающее действие на дыхательные пути и слизистую оболочку глаза. Длительное воздействие NO_2 при концентрации до 2 мг/м^3 приводит к хлорозу растений, при концентрации, равной 4 мг/м^3, возникает острое повреждение растений.

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

Очень токсичен пентаксид ванадия V_2O_5, входящий в состав золы мазута. Это вещество вызывает раздражение дыхательных путей у человека и животных, расстройство кровообращения и нервной системы, а также нарушение обмена веществ, поражает кожу.

Бенз(а)пирен обладает канцерогенными свойствами, т. е. способен вызывать злокачественные заболевания. Оксид углерода (CO) изменяет состав крови, приводит к нарушению нервной деятельности.

Библиотека ГГТУ им. П.О.Сухого

Конечной целью защиты атмосферного воздуха от загрязнения является решение трех основных задач: 1) создание замкнутых циклов производства с полезным использованием всех технологических отходов; 2) глубокая очистка вентиляционных выбросов; 3) перевод автотранспорта (со временем и авиации) на двигатели, не дающие токсичных выбросов в атмосферу. Для решения этих сложных задач требуется значительный период времени и совместные работы ученых и специалистов разных специальностей как внутри страны, так и в рамках международного сотрудничества, большие капитальные и эксплуатационные затраты. При разработке мероприятий по снижению выбросов в энергетике, металлургии и в других отраслях следует иметь в виду, что затраты на снижение выброса оксидов азота и совершенствование золоулавливания на порядок ниже, чем на очистку дымовых газов от оксидов серы и азота.

Основными задачами ближайших лет являются: а) разработка и применение различных технологических процессов и, прежде всего, процессов сжигания топлив с пониженным выбросом токсичных веществ в атмосферу; б) разработка, исследование и внедрение методов и аппаратов для улавливания или уничтожения основных токсичных веществ.

Библиотека ГГТУ им. П.О.Сухого

Тема 2. ВЫБРОСЫ ЗОЛОВЫХ ЧАСТИЦ С ДЫМОВЫМИ ГАЗАМИ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ В АТМОСФЕРУ

2.1. Характеристики летучей золы
2.2. Типы и характеристики золоуловителей
2.3. Инерционные золоуловители
2.4. Мокрые золоуловители
2.5. Электрофильтры
2.6. Золоотвалы, использование и утилизация золы

2.1. Характеристики летучей золы

Золой при определении характеристики топлива считается остаток, получающийся при прокаливании до постоянной массы навески топлива в присутствии кислорода при температуре 800 °С (1073 К).

Выброс золы при сжигании твердых топлив зависит от состава их минеральной части, типа топочного устройства и от эффективности работы пылеулавливающих устройств.

Вредное воздействие золы на организм зависит от ряда факторов (концентрация в воздухе, химический состав, размеры частиц и др.). Дисперсность твердых частиц имеет большое значение в связи с худшим улавливанием более мелких частиц. По данным исследований частицы размером менее 5 мкм, проникающие в легкие при дыхании, составляют значительную долю общего выброса.

Фазово-минералогические исследования состава золы различных видов твердого топлива показывают, что основной фазой всех видов золы является стекло. Кристаллическая фаза представлена различными количествами кварца, гематита, магнетика и различными силикатами кальция.

Характеристики золы (уноса), полученной в топках котлов, несколько отличаются по физико-химическим свойствам и химическому составу от золы, полученной в лабораторных условиях. Такое отличие определяется температурными условиями и временем сжигания частиц топлива в топке, где температура значительно выше 800 °С. Основными отличительными факторами является шлакование (расплавление) части минеральной составляющей топлива и наличие в золе частиц недогоревшего топлива (механического недожога).

Библиотека ГГТУ им. П.О. Сухого

Эффективность работы газоочистных устройств во многом 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 углей лежит в пределах 1900–2500 кг/м^3. Плотность определяется как отношение массы частиц золы к занимаемому ею объему, включая объемы пор и газовых включений.

Для выбора и расчета золоуловителей большое значение имеет распределение частиц по размерам – *дисперсный состав*. О частицах судят по размеру наименьшего отверстия сита, через которое частица диаметром *d* проходит при просеивании.

Расчет степени улавливания обычно ведется для каждой фракции частиц отдельно.

Для инерционных золоуловителей существенное значение имеет свойство *слипаемости* золы. По слипаемости зола делится на четыре группы: не слипающаяся (I), слабослипающаяся (II), среднеслипающаяся (III) и сильно слипающаяся (IV).

Зола с высокой слипаемостью забивает циклоны и мокрые золоуловители и плохо удаляется из бункеров. Это относится к золе АШ.

Для мокрых золоуловителей существенное значение имеет наличие в золе оксида кальция CaO. При большом содержании CaO их работа становится невозможной из-за цементации золы (сланец, КАУ).

При выборе и эксплуатации золоуловителей следует учитывать *абразивность золы* и ее *смачиваемость*.

Интенсивность абразивного износа золоуловителей зависит от твердости, размера, формы и плотности частиц. Абразивность золы характеризуется коэффициентом *a*, который определяет утонение стенки поперечно обтекаемой трубы из стали 20 в местах ее максимального износа при концентрации частиц 1 г/м^3 и скорости потока 1 м/с, при равномерном распределении поля скоростей и концентраций, при комнатной температуре в течение 1 ч. Смачиваемость частиц водой оказывает влияние на работу мокрых золоуловителей. Чем лучше смачиваемость, тем выше эффективность золоулавливания.

Основным показателем работы золоуловителя является степень улавливания золы

Библиотека ГГТУ им. П.О.Сухого

$$\eta = \frac{G_{\text{ВХ}} - G_{\text{ВЫХ}}}{G_{\text{ВХ}}} = \frac{C_{\text{ВХ}} - C_{\text{ВЫХ}}}{C_{\text{ВХ}}},$$

где $G_{\text{ВХ}}$ – количество золы, поступающей в золоуловитель в единицу времени, 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/м^3; $C_{\text{ВЫХ}}$ – то же на выходе, кг/м^3.

Для проведения расчетов удобна другая величина – проскок (унос) золы через золоуловитель ε:

$$\varepsilon = \frac{G_{\text{ВЫХ}}}{G_{\text{ВХ}}} = \frac{C_{\text{ВЫХ}}}{C_{\text{ВХ}}}.$$

Между степенью улавливания и проскоком имеет место следующее соотношение для оценки экологического совершенства золоуловителей:

$$\varepsilon = 1 - \eta.$$

2.2. Типы и характеристики золоуловителей

В зависимости от мощности ТЭС, зольности топлива, физико-химических свойств золы, санитарно-гигиенических условий в районе расположения электростанций выбирается тип золоуловителей. На выбор типа золоуловителей может повлиять и использование золы.

К основным требованиям, предъявляемым к системам золоулавливания, относятся высокая эффективность и эксплуатационная надежность.

Чем выше требуемая степень очистки газов и чем мельче подлежащие улавливанию частицы, тем большими оказываются удельные капитальные затраты на сооружение установок для улавливания золы и расходы на их эксплуатацию.

На ТЭС применяются три типа золоуловителей:

– аппараты сухой инерционной очистки газов (жалюзийные золоуловители, циклоны, прямоточные циклоны, батарейные циклоны);

– аппараты мокрой очистки газов;

– электрофильтры.

Фильтры, в которых используются пористые среды для очистки газов от твердых частиц (волокнистые, тканевые или рукавные, зернистые), не нашли широкого распространения из-за очень больших

Библиотека ГГТУ им.П.О.Сухого

габаритов и повышенной сложности в эксплуатации. Основная сложность заключается в накоплении золы в фильтрующем материале, что требует его периодической регенерации. Основное достоинство таких фильтров заключается в очень высокой степени очистки газов от пыли или золы, превышающей 99,9 %.

Прежде чем приступить к проектированию системы газоочистки, необходимо изучить конструкционные и эксплуатационные особенности имеющихся типов золоуловителей.

Каждый тип золоуловителя рассчитан на определенные условия работы. К ним относятся допустимая температура уходящих газов, возможность размещения на открытом воздухе и восприятия нагрузок от подводящих газоходов и площадок обслуживания, наличие необходимого количества воды для мокрых золоуловителей, система транспорта и использования золы.

Золоуловители всегда устанавливают перед дымососами по ходу дымовых газов для предохранения последних от абразивного износа. При двухступенчатой системе золоулавливания возможна установка дымососов между золоуловителями (в рассечку).

Решение об установке золоуловителей внутри или вне зданий принимается в зависимости от климатических условий и типа аппаратов. Наиболее сложные по конструкционному оформлению газоочистные аппараты – электрофильтры – устанавливаются вне зданий. Для защиты изоляторных коробок от осадков и облегчения условий их обслуживания верх электрофильтра закрывается шатром или специальной кровлей. Подбункерное пространство электрофильтров также укрывается легкими материалами.

Степень улавливания золы в золоуловителях колеблется в зависимости от свойств золы и условий эксплуатации в широких пределах. Так, степень улавливания η электрофильтров составляет 96–99,9 %; мокрых золоуловителей – 92–96 %; батарейных циклонов – 82–90 %.

Газоочистительные установки, как правило, не дают прибыли. Возможность использовать уловленный продукт обычно лишь частично окупает их сооружение. Поэтому технико-экономическая оценка газоочистных сооружений строится в основном на базе сравнительных данных. Сравнение аналога с оцениваемым вариантом производится по капитальным вложениям, численности обслуживающего персонала, производительности груда, эксплуатационным затратам, уровню приведенных затрат.

Библиотека ГГТУ им. П.О. Сухого

2.3. Инерционные золоуловители

Циклонные (инерционные) золоуловители

В качестве *инерционных* (механических) золоуловителей наибольшее распространение получили циклоны, в которых осаждение твердых частиц происходит за счет центробежных сил при вращательном движении потока. Принцип действия циклонных золоуловителей (циклонов) представлен на рис. 2.1. Очищаемый от пыли (летучей золы) газ тангенциально входит в цилиндрическую оболочку (корпус), переходящую внизу в конус. Благодаря вращательному движению потока центробежные силы отбрасывают частицы пыли к периферии и, ударяясь о стенку, последние теряют скорость и вдоль стенки падают в нижнюю часть конуса, а затем удаляются из потока газов под действием силы тяжести вниз в коническую воронку и далее в общий бункер. Выход газов вниз заполнен золой, и поэтому поток газов, вращаясь, поворачивает вверх в центральный патрубок и удаляется из корпуса золоуловителя, освобождаясь от большей части летучей золы.

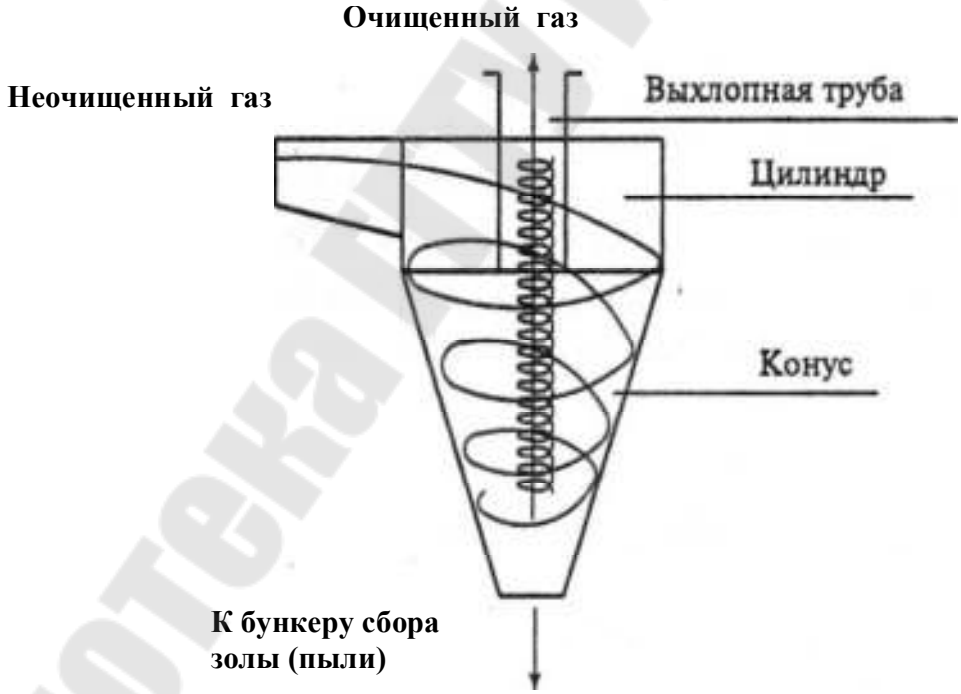


Рис. 2.1. Основные элементы
и принцип действия циклонного золоуловителя

Значение центробежной силы F, действующей на частицу диаметром d, м, движущуюся по радиусу циклона R, м, при скорости потока газов u, м/с, можно определить по выражению

Библиотека ГГТУ им. П.О.Сухого

$$F = \rho \frac{\pi d^2}{6} \frac{u^2}{R},$$

где ρ – плотность частицы, кг/м^3.

С уменьшением диаметра циклона скорость потока возрастает и степень очистки газов от летучей золы повышается. В связи с этим в энергетике нашли применение небольшие по диаметру циклоны, объединяемые в параллельные группы для обеспечения требуемого расхода газов через них. Они получили название *батарейных* или *мультициклонов* (рис. 2.2).

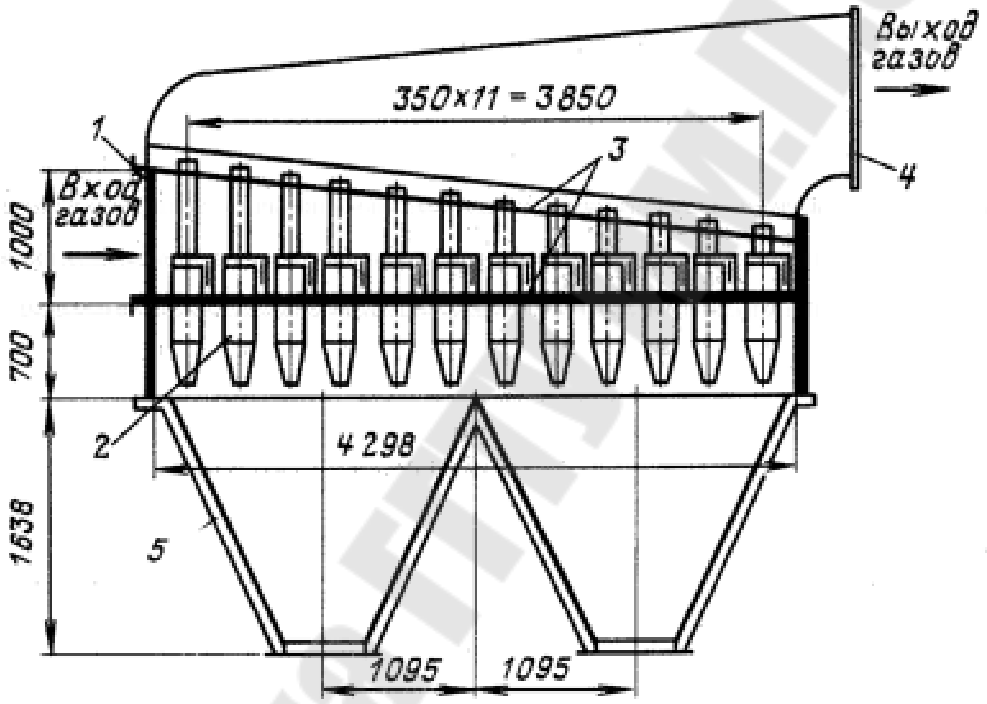


Рис. 2.2. Батарейный циклон: *1* – входной патрубок запыленного газа; *2* – циклонный элемент; *3* – трубные доски; *4* – выходной патрубок очищенного газа; *5* – бункер для золы

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

Библиотека ГГТУ им. П.О. Сухого

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

Не так широко, как циклоны или батарейные циклоны применяются на ТЭС другие типы инерционных золоуловителей. Однако в промышленной теплоэнергетике, металлургии, нефтегазовой промышленности, деревообрабатывающем производстве и некоторых других семейство циклонных пылеуловителей представлено достаточно разнообразно. К ним относят:

– жалюзийные пылеуловители;
– вихревые пылеуловители;
– отражательные инерционные пылеуловители;
– ротационные пылеуловители.

Кроме того, для улавливания частиц размером от 100 до 1000 мкм применяют также осадительные камеры.

Жалюзийные пылеуловители

Жалюзийные пылеуловители – это аппараты для очистки газов от пыли инерционного действия. Движущийся в газопроводе запыленный поток встречается с жалюзийной решеткой, состоящей из ряда наклонно установленных пластин (рис. 2.3).

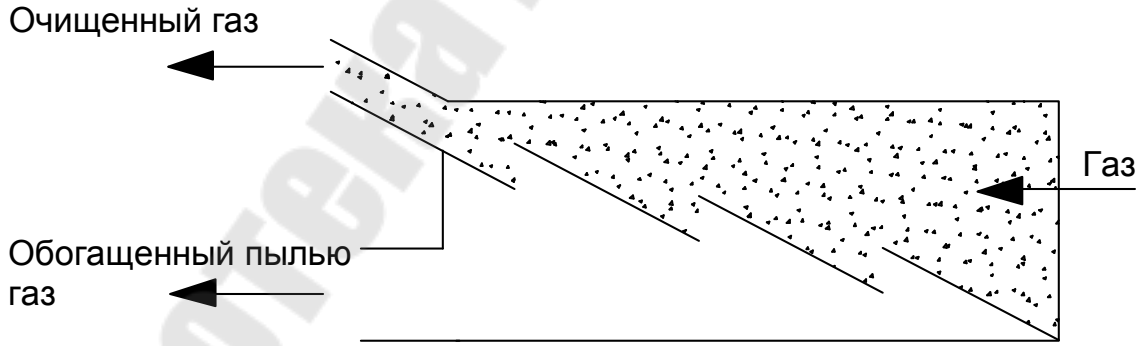


Рис. 2.3. Схема действия жалюзийного пылеуловителя

Огибая пластины, струи газа резко меняют направление движения, проходят на другую сторону решетки и движутся в прежнем направлении. Частицы пыли, встречаясь с пластинами решетки, стремятся по инерции сохранить первоначальное направление движения, не огибают пластину, а ударяются о ее поверхность и отражаются в

Библиотека ГГТУ им. П.О. Сухого

сторону, противоположную движению газов. Затем опять поворачивают по направлению газового потока, ударяются о следующую по ходу газов пластину и т. д. В результате газы, прошедшие через решетку, очищаются, а газы, оставшиеся по другую сторону решетки, обогащаются пылью. Эта часть газового потока (около 10 % газов) направляется для окончательной очистки в другой пылеуловитель – циклон.

Жалюзийный пылеуловитель применяют для улавливания пыли размером больше 20 мкм.

Вихревые пылеуловители

Вихревые пылеуловители (ВПУ) – это аппараты центробежного действия для очистки газов от пыли. Отличительная особенность ВПУ – высокая степень очистки газов от тончайших фракций (<3–5 мкм) пыли. Существует две основные разновидности ВПУ: сопловой (рис. 2.4, *а*) и лопаточный (рис. 2.4, *б*).

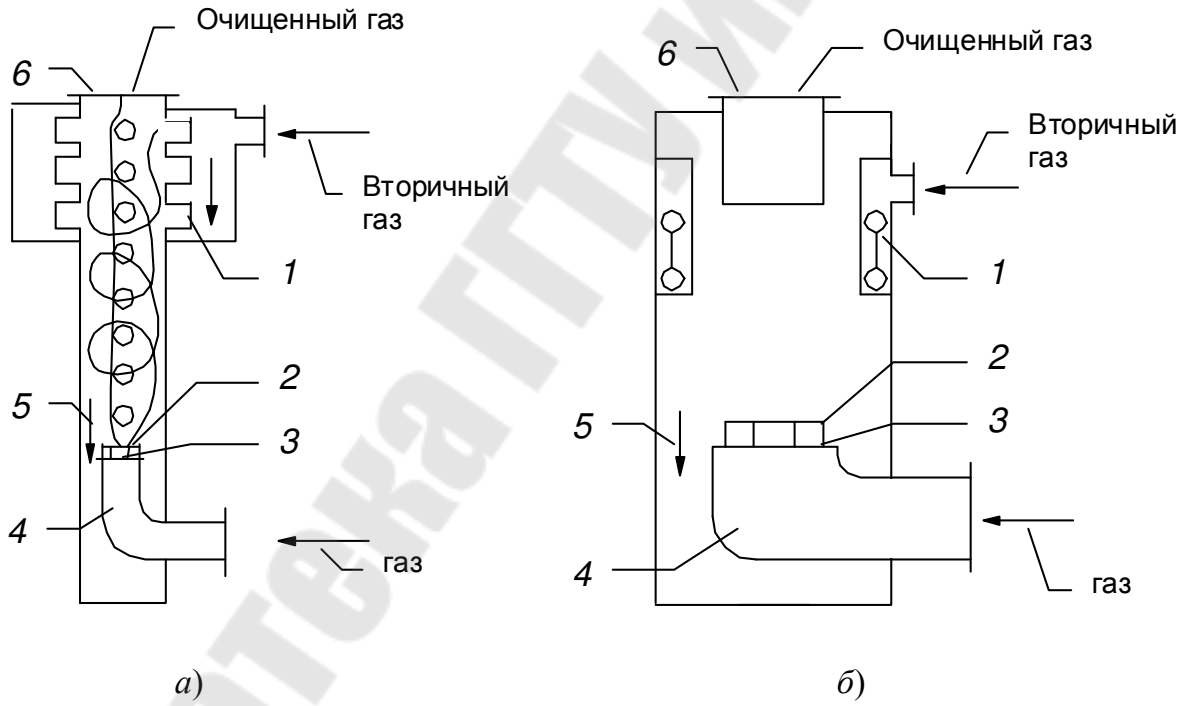


Рис. 2.4. Вихревые пылеуловители: *а* – сопловой; *б* – лопаточный

Процесс обеспыливания в ВПУ происходит следующим образом: запыленный газ поступает в камеру *5* через изогнутый патрубок *4*. Для предварительного закручивания запыленного газа в камеру *5* встроен лопаточный завихритель типа розетки *2*. Двигаясь вверх к выходному патрубку *6*, газовый поток подвергается воздействию вытекающих из завихрителя *1* (наклонные сопла в ВПУ соплового

Библиотека ГГТУ им. П.О. Сухого

типа, наклонные лопатки в ВПУ лопаточного типа) струй вторичного воздуха, которые придают потоку вращательное движение. Под действием центробежных сил, возникающих при закручивании потока, частицы пыли устремляются к периферии, откуда спиральными струями вторичного потока перемещаются вниз аппарата, в кольцевое межтрубное пространство. Безвозвратный спуск пыли в бункер обеспечивается подпорной шайбой *3*. Вторичный воздух в ходе спирального обтекания потока очищаемого газа постепенно проникает в него.

Отражательные инерционные пылеуловители

Отражательные инерционные пылеуловители – это аппараты для выделения пыли из газового потока, в которых происходит изменение направления газового потока. Сталкиваясь с каким-нибудь телом, обтекая его, частицы пыли или капли, обладающие большей инерцией, ударяются о поверхность тела и оседают на ней. Некоторые типы отражательных пылеуловителей приведены на рис. 2.5.

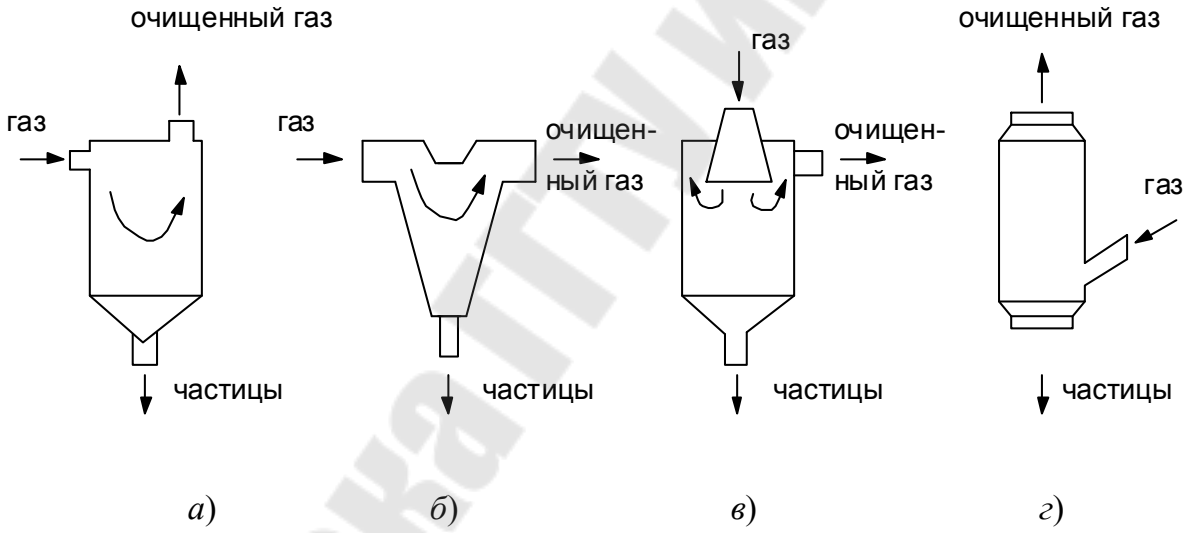


Рис. 2.5. Отражательные пылеуловители:
а – с перегородкой; *б* – с плавным поворотом газового потока;
в – с расширяющимся конусом; *г* – с боковым подводом газа

Ротационные пылеуловители

Ротационные пылеуловители – это аппараты для очистки газов от пыли, центробежного действия, которые одновременно с перемещением газов очищают его от фракций пыли крупнее 5 мкм. Конструктивная схема простейшего пылеуловителя ротационного типа представлена на рис. 2.6.

Библиотека ГГТУ им. П.О. Сухого

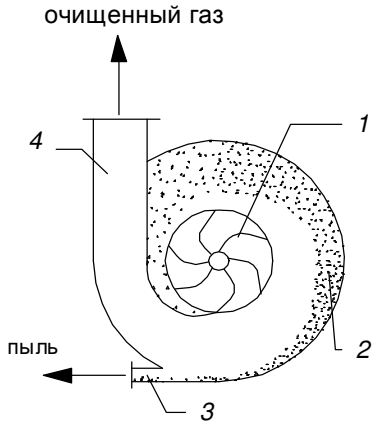


Рис. 2.6. Пылеуловитель ротационного типа:
1 – вентиляторное колесо; *2* – кожух; *3* – пылеприемное отверстие;
4 – выхлопной патрубок

При работе вентиляторного колеса *1* частицы пыли за счет центробежных сил отбрасываются к стенке спиралеобразного кожуха *2* и двигаются по ней в направлении выходного отверстия *3*. Газ, обогащенный пылью, через специальное пылеприемное отверстие *3* отводится в пылевой бункер, а очищенный газ поступает в пылевую трубу *4*.

2.4. Мокрые золоуловители

Простейшим типом мокрого золоуловителя является центробежный скруббер (рис. 2.7, *а*). Главным отличием его от сухого инерционного золоуловителя является наличие на внутренней стенке стекающей пленки воды. Отсепарированная за счет центробежных сил зола лучше отводится из скруббера в бункер, при этом уменьшается вторичный захват зольных частиц со стенки газовым потоком.

Мокропрутковый золоуловитель во входном патрубке *1* (рис. 2.7, *а*) имеет шахматный пучок горизонтальных прутков диаметром 20 мм. Прутковые решетки орошаются водой, распыливаемой механическими форсунками, установленными по ходу очищаемых газов перед решетками. Улавливание золы в этом аппарате проходит две ступени: на орошаемых решетках за счет осаждения частиц золы и на внутренней орошаемой поверхности скруббера. Эффективность золоулавливания составляет 88–90 %.

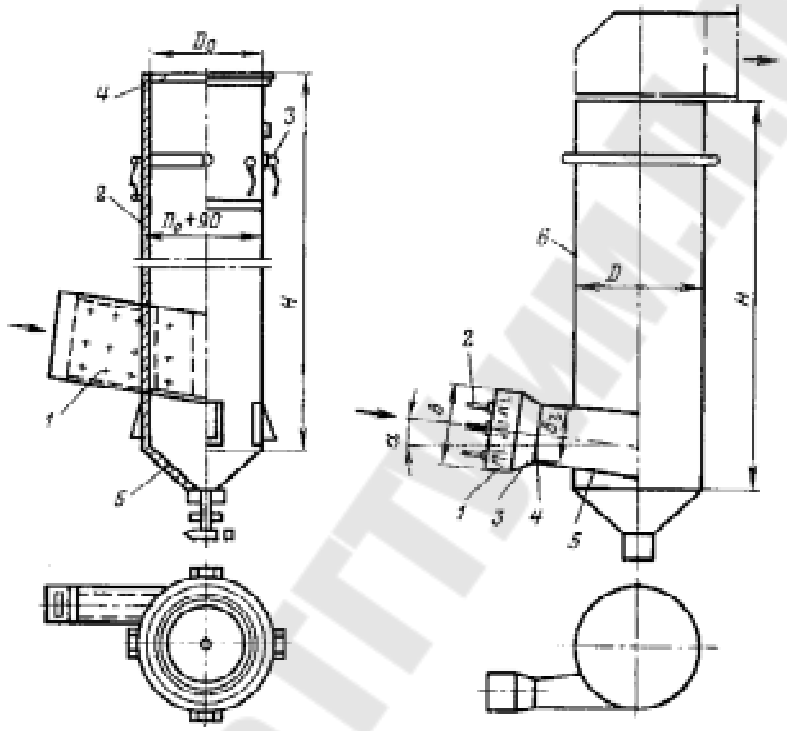
Недостатками золоуловителей этого типа кроме низкой эффективности золоулавливания являются следующие:

Библиотека ГГТУ им. П.О. Сухого

– возникновение отложений золы в прутковых пучках, что приводит к увеличению аэродинамического сопротивления и снижению нагрузки котла;

– повышенный расход воды для обеспечения нормального функционирования золоуловителя.

В настоящее время разработаны и внедрены на многих электростанциях более эффективные мокрые золоуловители с коагуляторами Вентури (рис. 2.7, *б*).



а) *б*)

Рис. 2.7. Мокрые золоуловители: *а* – центробежный скруббер: *1* – входной патрубок запыленного газа; *2* – корпус золоуловителя; *3* – оросительные сопла; *4* – выход очищенного газа; *5* – бункер; *б* – золоуловитель с коагулятором Вентури: *1* – входной патрубок запыленного газа; *2* – подача воды через оросительные сопла; *3*, *4*, *5* – конфузор, горловина и диффузор коагулятора Вентури; *6* – скруббер-каплеуловитель

Коагуляторы Вентури могут устанавливаться как вертикально, так и горизонтально с небольшим уклоном.

Рассмотрим принцип работы мокрого золоуловителя с коагулятором Вентури (рис. 2.7, *б*). В конфузор *3* коагулятора через форсунки подается орошающая вода, которая дополнительно диспергируется (распыляется) скоростным газовым потоком на мелкие капли. Летучая зола при прохождении с дымовыми газами через коагулятор час-

Библиотека ГГТУ им. П.О. Сухого

тично осаждается на каплях и на его орошаемых стенках. Далее капли и неуловленные частицы золы поступают в корпус аппарата – центробежный скруббер, где дымовые газы освобождаются от капель и дополнительно очищаются от золы, после чего дымососом выбрасываются в атмосферу. Гидрозоловая пульпа сбрасывается через гидрозатвор в канал системы гидрозолоудаления (ГЗУ).

Основными достоинствами этих аппаратов являются стабильная степень очистки газов от золы, составляющая 94–96 %, относительно небольшие капитальные и эксплуатационные затраты, а также возможность работы на оборотной воде.

2.5. Электрофильтры

Одним из хорошо зарекомендовавших себя и перспективным типом золоуловителей для крупных ТЭС являются электрофильтры, которые могут обеспечить высокую степень очистки газов при аэродинамическом сопротивлении не более 150 Па практически без снижения температуры и без увлажнения дымовых газов.

В электрофильтрах запыленный газ движется в каналах, образованных осадительными электродами *1* (рис. 2.8), между которыми расположены через определенное расстояние коронирующие электроды *2*.

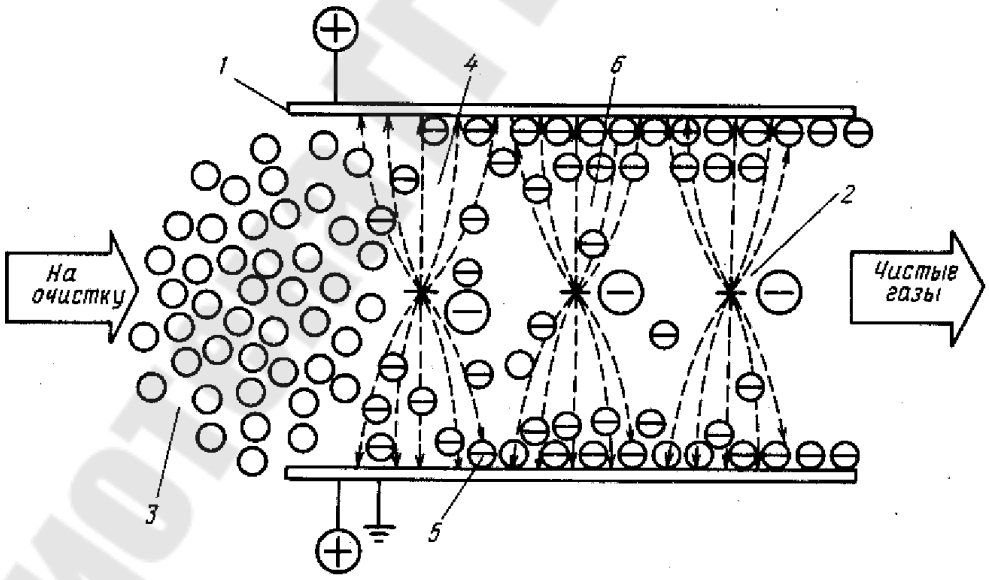


Рис. 2.8. Принцип работы электрофильтра: *1* – осадительный электрод; *2* – коронирующий электрод; *3* – частицы золы; *4* – электрическое поле; *5* – слой осевшей золы; *6* – заряженная зола

Библиотека ГГТУ им. П.О. Сухого

Сущность процесса электрической очистки газов заключается в следующем. Запыленный газ проходит через систему, состоящую из заземленных *осадительных электродов 7* и размещенных на некотором расстоянии (называемом межэлектродным промежутком) *коронирующих электродов 2*, к которым подводится выпрямленный электрический ток высокого напряжения с отрицательным знаком.

При достаточно высоком напряжении, приложенном к межэлектродному промежутку, у поверхности коронирующего электрода происходит интенсивная ударная ионизация газов, сопровождающаяся возникновением коронного разряда (ток короны).

Газовые ионы различной полярности, образующиеся в зоне короны, под действием сил электрического поля движутся к разноименным электродам, вследствие чего в электродном промежутке возникает электрический ток, который и представляет ток короны. Частицы золы из-за адсорбции на их поверхности ионов приобретают в межэлектродном промежутке электрический заряд и под влиянием сил электрического поля движутся к электродам, осаждаясь на них. Основное количество частиц осаждается на развитой поверхности осадительных электродов, меньшая их часть попадает на коронирующие электроды. По мере накопления на электродах осажденные частицы удаляются встряхиванием или промывкой электродов.

Процесс электрогазоочистки можно разделить на следующие стадии:

1) зарядка взвешенных в газе частиц;
2) движение заряженных частиц к электродам;
3) осаждение частиц на электродах;
4) удаление этих частиц с электродов.

Коронный разряд возникает при достижении определенной напряженности и электрического поля, называемой критической или начальной, которая, например, для воздуха при атмосферном давлении и температуре 20 °С составляет около 15 кВ/см. При дальнейшем повышении напряженности нарушается электрическая прочность газового промежутка между электродами, наступает искровой или дуговой электрический разряд.

К коронирующим электродам подводится отрицательный заряд, так как подвижность отрицательных ионов выше положительных. Кроме того, при отрицательной короне удается поддержать более высокое напряжение без искрового пробоя между электродами.

Библиотека ГГТУ им. П.О. Сухого

Рабочая часть электрофильтра, в которой существует электрическое поле, называется активной зоной. Она разделена на несколько электрических полей, через которые очищаемый газ проходит последовательно. Электрофильтры бывают однопольными и многопольными.

Для удаления осевшей на электродах золы предусмотрены встряхивающие устройства в виде молотков, ударяющих по наковальням электродов. Осевшая зола попадает в бункера и затем через гидравлические затворы направляется в систему ГЗУ. Расчетная температура газов до 250 °С.

2.6. Золоотвалы, использование и утилизация золы

Влияние золошлакоотвалов на окружающую среду

Золошлаки по объему образования занимают одно из первых мест среди отходов энергетического производства.

Из-за пыления золоотвалов загрязняется окружающая среда прилегающих районов, что отрицательно влияет на здоровье людей, а также на продуктивность сельскохозяйственных угодий.

Негативное влияние золы, сдуваемой с поверхности золошлакоотвала, проявляется при определенных ее концентрациях в атмосферном воздухе и в почве, а этот фактор зависит от такого ряда условий, как:

– площадь и высота над уровнем земли отработанного золошлакоотвала;

– конфигурация золошлакоотвала в направлении господствующих ветров;

– скорость ветра и количество ветреных дней в сухой теплый период года;

– фракционный состав и влажность золошлаков.

Исследования и расчеты рассеивания золы, поступающей в атмосферу с поверхности золошлакоотвала, показывают, что при сильном ветре концентрация золы, превышающая предельно допустимую, может наблюдаться на расстоянии до 4 км от кромки отвала.

Одной из наиболее серьезных и сложных проблем является защита подземных и поверхностных вод от загрязнения токсичными химическими элементами и их соединениями.

Библиотека ГГТУ им. П.О. Сухого

Для уменьшения утечки фильтрационной воды из золоотвалов применяют экранированные ложа отвалов. В качестве экрана можно использовать полиэтиленовую пленку.

В зонах интенсивного осаждения золы длительное ее воздействие изменяет реакцию почв со слабокислой на слабощелочную, способствует накоплению в почве повышенного содержания кальция, железа и магния, уменьшает содержание органического углерода, т. е. происходит существенное изменение свойств почвы, что не может не сказаться на растительном мире.

На таких почвах деревья интенсивнее поглощают магний, железо и медь и испытывают недостаток в марганце и барии, что ведет к нарушению обменных процессов. У молодых сосен это выражается в гигантизме стволов и карликовости побегов и хвои, а в конечном результате – в отмирании побегов. У березы и осины наблюдаются явления преждевременного старения, замедленного прироста и усыхания верхушек взрослых деревьев.

Методика создания систем золошлакоудаления с высокими экологическими показателями

Для создания систем ЗШУ с высокими экологическими показателями следует руководствоваться следующими положениями.

1. Тепловые электростанции на твердом топливе являются источником не только тепловой и электрической энергии, но и ценного минерального сырья техногенного происхождения в виде золы и шлака.

2. Системы ЗШУ должны выполнять следующие основные задачи:

– обеспечивать максимальную отгрузку золошлаков с исходными и измененными свойствами для использования их в качестве заменителей природного сырья при производстве товарной продукции на предприятиях различных отраслей экономики;

– размещать невостребованную часть золошлаков экологически приемлемыми способами на золошлакохранилищах (ЗШХ).

Наиболее эффективный способ улучшения экономических показателей систем золоудаления – максимально возможная реализация золы потребителям в объеме до 100 % текущего выхода.

Использование золошлаков ТЭС

Из общемировой практики известно, что 100%-ное полезное использование золошлаков ТЭС встречается крайне редко.

Во всем мире золошлаковые материалы (ЗШМ) угольных ТЭС давно рассматриваются как ценное сырье и самостоятельный строи-

Библиотека ГГТУ им.П.О.Сухого

тельный материал. Например, в Германии используется 70 % золошлаков, во Франции – 55 %, в Великобритании и Бельгии – 42 %.

Предприятия, использующие ЗШМ, для сертификации своей конечной продукции, как правило, должны иметь данные по радиоактивности ЗШМ. В последние годы вопросами радиоактивности ЗШМ занимались многие организации. Было доказано, что в своем большинстве ЗШМ не радиоактивны. Повышенная же радиоактивность некоторых видов углей после высокотемпературной обработки в топках котлов может снижаться до фонового уровня.

Золошлаковые материалы можно применять для производства асфальтобетона совместно с цементом или в качестве добавок к нему в целях его экономии.

В настоящее время развивается очень важное направление применения золошлаковой смеси с целью частично или полностью заменить природный крупный и мелкий заполнитель (песок) в тяжелом бетоне, используемом на комбинатах по производству сборных железобетонных изделий и конструкций, в связи с появлением в ряде районов острого дефицита в таком заполнителе.

При введение золошлаков в бетоны различных видов отмечается улучшение технологических свойств бетонных смесей, сокращение времени и энергозатрат, связанных с укладкой и уплотнением бетонных смесей; улучшение качества лицевой поверхности изделий.

Использование золы и шлака ТЭС в качестве добавок при производстве красного кирпича позволяет повысить массообменные характеристики сырца и ускорить процесс сушки с одновременным снижением расхода топлива (на 20–40 %), повысить прочность кирпича и снизить долю брака после сушки и обжига.

Золошлаковые материалы можно использовать для производства таких легких заполнителей, как зольный гравий, шлакозит и др.

Перспективной является технология производства сухих строительных смесей с использованием золы уноса. При этом на заводах железобетонных изделий вместо цемента и песка для производства бетона и строительных растворов может быть применена сухая строительная смесь, что позволит использовать существующие бетоносмесительные узлы без какой-либо доработки.

В результате плавления минеральных компонентов при сжигании углей, последующего дробления расплава в газовом потоке на отдельные мельчайшие капли и раздувания последних благодаря увеличению газовых включений в составе золы-уноса образуется микро-

Библиотека ГГТУ им. П.О.Сухого

сфера (ценосфера). *Микросфера* – полые стекловидные шарики, имеющие ряд ценных специфических свойств, обеспечивающих их применение в самых различных областях. Благодаря правильной сферической форме и низкой плотности микросферы могут служить прекрасным наполнителем для самых разнообразных изделий.

В настоящее время наиболее широкое применение микросферы нашли как:

– легкий заполнитель пластмасс, резины, красок, бумаги; легкий жаропрочный заполнитель стройматериалов и керамических изделий;

– теплозащитный материал (в том числе для жаропрочного покрытия космических кораблей);

– легкий заполнитель электроизоляционных материалов; катализатор в нефтепереработке;

– сорбент для ликвидации нефтепродуктов на поверхности воды; пожаротушитель легковозгораемых материалов; почвенный слой для быстрого выращивания растений методом гидропоники.

Золошлаковые материалы применяют для тушения пожаров, вертикальной планировки территорий.

По данным Европейской Ассоциации по использованию продуктов сжигания угля в 15 странах Европейского сообщества золошлаковые материалы в 1999 г. использовались следующим образом:

45–48 % – в строительной индустрии;

37–40 % – для восстановления открытых разрезов, выработок и карьеров;

2 % временно хранились в силосных башнях (для последующего использования);

10–19 % хранятся в золошлаковых отвалах.

Рекультивация нарушенных земель

Для предотвращения негативного воздействия полигонов ЗШМ (золошлакоотвалов) на природу и человека возможна рекультивация отработанных полигонов с целью:

– предотвратить загрязнение воздушного бассейна, почвы отработанным золоотвалом, путем фиксации поверхности (нанесением специальных покрытий, слоя грунта, насаждением трав, кустарниковых и древесных пород);

– исключить загрязнение водных объектов, в том числе грунтовых вод, при вымывании токсикантов из золошлаков путем осушения отобранного отвала;

Библиотека ГГТУ им. П.О.Сухого

– обеспечить соответствующей обработкой отвала наиболее эффективное хозяйственное использование территории золоотвала с учетом хозяйственных и иных потребностей.

Золошлаки – это «стерильные» материалы, лишенные органических веществ, имеющие лишь следы азота; количество фосфора и калия в них недостаточно для питания растений, поэтому самозарастание золошлакоотвалов – процесс очень медленный: покрытие его поверхности растениями до прекращения пыления длится от 10 до 15 лет. Чаще всего рекультивация золоотвалов не может вернуть изъятые под них площади в первоначальное состояние. В большинстве случаев экономически и экологически нецелесообразна сельскохозяйственная рекультивация в целях производства товарной продукции растениеводства или выращивания кормов для скота. Для обеспечения экологической чистоты товарной продукции или кормов необходимо уложить на отвал огромный объем грунта и плодородной почвы (слоем толщиной не менее 1 м), так что выращенная продукция становится явно убыточной, а разработка и перемещение плодородной почвы и грунта для укрытия отвала создают новые площади нарушенных земель. Ограничены также возможности использования территории рекультивированного золоотвала для выпаса скота, так как это связано с опасностью нарушения поверхностного слоя и его ветровой эрозии.

Сельскохозяйственную рекультивацию следует проводить только при остром недостатке земель, пригодных для выращивания растениеводческой продукции. Растения, произрастающие на золошлакоотвале, поверхность которого не покрыта или покрыта недостаточно мощным слоем почвы, не предотвращающим проникновения корней растений в золу, могут накапливать в биомассе большое количество микроэлементов, концентрация которых может достигать потенциально опасного уровня для животных, пасущихся на подножном корму, и для человека.

Основным направлением рекультивации нарушенных земель являются *санитарно-гигиеническая рекультивация* (консервация) – основной вид восстановления отработавших золошлакоотвалов, в результате которого решаются санитарно-гигиенические задачи; рекультивация проводится в один (технический) или в два (технический и биологический) этапа.

Библиотека ГГТУ им. П.О.Сухого

Технический этап рекультивации должен включать в себя планирование (выравнивание) поверхности, покрытие ее грунтом (сплошным слоем или полосами).

Биологический этап рекультивации включает в себя:

– внесение в покрывающую золошлаковую почву или в золу минеральных или органических удобрений;

– посев многолетних злаковых и бобовых либо местных, неприхотливых, наиболее устойчивых видов трав;

– посадку саженцев деревьев и кустарников;

– уход за посевами и саженцами.

Территории отработанных полигонов ЗШМ, расположенных в городской черте либо вблизи населенного пункта, целесообразно передавать органам местного самоуправления или отдельным организациям под возведение зданий и сооружений. Проектирование и возведение строительных объектов выполняются в соответствии с требованиями действующих строительных норм и правил.

Золоотвал, подвергнутый санитарно-гигиенической рекультивации (законсервированный), не может быть использован для произвольного сенокошения и выпаса скота, поскольку скот может нанести значительный урон посевам и нарушить плодородный слой, а трава – содержать повышенную концентрацию микроэлементов.

Библиотека ГГТУ им. П.О. Сухого

Тема 3. ВЫБРОСЫ ОКСИДОВ АЗОТА С ДЫМОВЫМИ ГАЗАМИ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ В АТМОСФЕРУ

3.1. Влияние оксидов азота на окружающую среду. Нормативы выбросов оксидов азота

3.2. Механизмы образования оксидов азота

3.3. Первичные мероприятия, направленные на уменьшение выбросов NO_x

3.4. Вторичные мероприятия по уменьшению выбросов NO_x

3.1. Влияние оксидов азота на окружающую среду. Нормативы выбросов оксидов азота

Наиболее опасными выбросами ТЭС являются оксиды азота. Содержание оксидов азота определяет токсичность продуктов сгорания угля и мазута на 40–50 %, а природного газа на 90–95 %. Кроме того, оксиды азота под воздействием ультрафиолетового излучения активно участвуют в фотохимических реакциях в атмосфере с образованием других вредных газов.

Основное количество оксидов азота поступает в атмосферу Земли в результате природных процессов. В глобальном масштабе количество оксидов азота, образующихся естественным путем в результате жизнедеятельности почвенных бактерий, а также при вулканической деятельности и разрядах молний, по различным источникам, составляет от 800 до 1100 млн т/год. Это намного превосходит выброс оксидов азота, образующихся в результате человеческой деятельности. Однако в результате бурного развития промышленности и транспорта антропогенный выброс оксидов азота увеличивается год от года, практически удваиваясь каждые 20–25 лет.

Оксиды азота антропогенного происхождения составляют менее 10 % всех оксидов азота. Но именно антропогенные выбросы представляют наибольшую опасность, поскольку они сосредоточены в крупных промышленных центрах.

Одним из основных источников антропогенных выбросов NO_x в атмосферу являются ТЭС. Количество этих выбросов зависит от вида топлива, а при сжигании твердого топлива – и от способа шлакоуда-

Библиотека ГГТУ им. П.О. Сухого

ления. Виды топлива, приводящие к выбросам оксидов азота, это: нефть и нефтепродукты, используемые для сжигания, природный газ, а также твердые виды топлива. Атмосфера не загрязняется выбросами оксидов азота при производстве энергии на гидравлических, атомных, геотермальных, солнечных, ветровых электростанциях.

Оксид азота NO – малоактивный в химическом отношении бесцветный газ, лишенный запаха и плохо растворимый в воде. При комнатной температуре и атмосферном давлении растворимость NO составляет всего лишь 0,047 $см^3/г$, с повышением температуры растворимость падает. Диоксид азота NO_2 более активен, он красно-бурого цвета и отличается резким запахом.

Среди различных оксидов азота N_2O, NO, N_2O_3, NO_2, N_2O_4, N_2O_5 практическое значение в экологическом аспекте имеют только монооксид NO и диоксид NO_2 азота, сумму которых принято обозначать как NO_x. Монооксид азота – прозрачный бесцветный газ, превращающийся в жидкость при температуре –157,7 °С и атмосферном давлении. Это малоактивный, плохо растворимый в воде газ. Образующиеся при сжигании топлива и содержащиеся в дымовых газах оксиды азота на 97–99 % состоят из NO. Монооксид азота относительно менее токсичен, чем NO_2. Принятые значения ПДК оксидов азота в атмосфере приведены в таблице 3.1, где $ПДК_{М.Р}$ – максимально разовая, $мг/м^3$, и $ПДК_{С.С}$ – среднесуточная, $мг/м^3$.

Таблица 3.1

Принятые значения предельно допустимой концентрации оксидов азота в атмосфере

Формы оксидов азота	**$ПДК_{М.Р}$, $мг/м^3$**	**$ПДК_{С.С}$, $мг/м^3$**
NO	0,6	0,06
NO_2	0,085	0,04

Однако в шлейфе дымовых газов из труб ТЭС происходит доокисление NO до NO_2, степень которого зависит от большого количества факторов (среди которых – метеоусловия, химический состав атмосферы, время суток и др.), и находится в пределах 60–80 %.

В отличие от NO диоксид NO_2 более активный в химическом отношении газ красно-бурого цвета с удушливым и резким раздражающим запахом. Диоксид азота NO_2 хорошо растворим в воде, легко сжижается при атмосферном давлении и t = 21,15 °С в красно-бурую

Библиотека ГГТУ им. П.О.Сухого

жидкость, которая при t = 10,2 °С твердеет, образуя бесцветные кристаллы. Диоксид азота NO_2 оказывает отрицательное влияние на здоровье человека и прежде всего на его дыхательную систему. Крайне опасным для жизни может оказаться даже кратковременное вдыхание воздуха с концентрацией диоксида азота.

Среднее время пребывания этих оксидов в атмосфере составляет примерно 4 дня.

Существует еще одна проблема, связанная с присутствием в атмосфере оксидов азота. Соединяясь с атмосферной влагой, оксиды азота образуют слабые растворы азотистой и азотной кислот. Это приводит к выпадению так называемых кислотных дождей, причиной которых являются антропогенные выбросы в атмосферу не только оксидов азота, но и оксидов серы.

Пагубное воздействие кислотных дождей на окружающую человека среду принимает в последние годы все более угрожающие масштабы. Под воздействием кислотных дождей происходит закисление почв и обеднение их питательными элементами. Следствием этого являются снижение продуктивности ряда сельскохозяйственных культур и увеличение кислотности вод поверхностных водоемов, что наносит ущерб рыбному хозяйству.

От кислотных дождей происходит деградация и полная гибель лесных массивов. Кислотные дожди усиливают коррозию строительных материалов, памятников архитектуры и других культурных ценностей. По некоторым оценкам, ущерб от деградации окружающей среды во многих странах соизмерим с уровнем национального дохода в расчете на душу населения.

Проблема кислотных дождей осложняется тем, что в силу природных условий происходит трансграничный перенос SO_2 и NO_x. В связи с этим решить проблему на национальном уровне практически невозможно. Так, например, Норвегия имеет самые низкие в Европе выбросы в атмосферу сернистого ангидрида и оксидов азота. Примерно 92 % вредных веществ в атмосферу Норвегии «импортировано» из других стран. В Швеции эта цифра составляет 82 %, в Финляндии – 74 % .

Очень остро проявляется проблема кислотных дождей в канадо-американских отношениях в связи с тем, что 50–60 % кислотных осадков, выпадающих в Канаде, поступает от источников, расположенных в северо-восточных штатах США. При этом Канада подвер-

Библиотека ГГТУ им. П.О.Сухого

жена большему по сравнению с США ущербу от кислотных дождей: по сернистому ангидриду – в 4 раза, по оксидам азота – в 11 раз.

Еще одна вредная особенность оксидов азота, имеющая в отличие от кислотных дождей локальный характер, т. е. проявляющаяся в местах интенсивного выброса NO_x, состоит в снижении прозрачности атмосферы и в образовании фотохимического тумана – смога. Это явление наблюдается главным образом в городах с интенсивным автомобильным движением и вследствие этого – с повышенной концентрацией углеводородов в воздухе. Под действием солнечной радиации диоксид азота, обладающий высокой поглощающей способностью в ультрафиолетовой области, разлагается на оксид азота и атомарный кислород, образующий озон. Эта диссоциация приводит к большому количеству вторичных реакций, в результате которых появляется ядовитый смог.

Из приведенных данных видно, что для получения высоких экологических показателей тепловых электрических станций необходимы специальные мероприятия по сокращению выброса NO_x в атмосферу.

3.2. Механизмы образования оксидов азота

Источником образования оксидов азота служит азот воздуха и топлива. В атмосферном воздухе содержится 78,1 % азота по объему.

Азот является составной частью рабочей массы топлива. Содержание азота в топливе относительно невелико: не более 2 % в ископаемом угле, не более 0,5 % в антраците, до 1 % в торфе и горючем сланце, до 1–1,5 % в топочном мазуте и природном газе и лишь в отдельных месторождениях природный газ содержит до 4 % молекулярного азота.

Для разработки путей борьбы с образованием оксидов азота важно знать, как они образуются. В настоящее время хорошо изучены три принципиально разных источника оксидов азота:

– образование термических NO из молекулярного азота воздуха при температуре выше 1300 °С (механизм Зельдовича);

– образование NO из азота, содержащегося в топливе (топливные NO);

– образование NO путем реакции молекулярного азота воздуха с углеводородными радикалами («быстрые» NO).

Библиотека ГГТУ им. П.О.Сухого

Зависимость образования оксидов азота от температуры представлена на рис. 3.1.

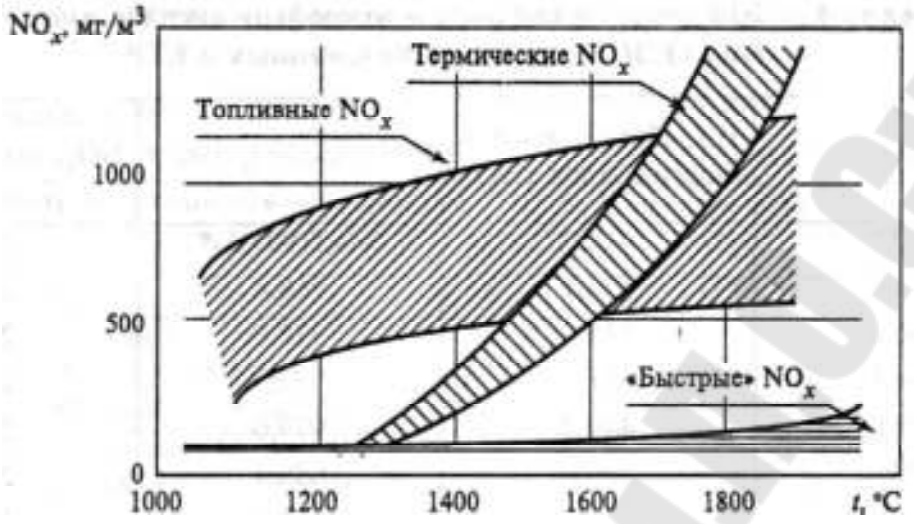


Рис. 3.1. Зависимость образования оксидов азота от температуры при сжигании органического топлива

Образование термических оксидов азота

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

Итоговую реакцию можно записать в виде

$$N_2 + O_2 \rightarrow 2NO.$$

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

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

Скорость образования термических NO увеличивается с ростом температуры, она прямо пропорциональна концентрации азота и времени пребывания продуктов горения в зоне генерации оксидов азота, а также корню квадратному из концентрации кислорода. Поэтому первичные (режимно-технологические) мероприятия для снижения

Библиотека ГГТУ им. П.О. Сухого

образования термических NO_x основаны на воздействии на один или несколько факторов в зоне максимальной генерации NO_x и на создании специальных условий в факеле горения, приводящих к восстановлению образовавшихся оксидов азота до молекулярного азота, как это, например, делается при ступенчатом сжигании топлива.

Образование топливных оксидов азота

Образование топливных оксидов азота осуществляется в два этапа: сначала происходит газификация капель мазута или угольных частиц с выделением азотосодержащих соединений (радикалов R) типа CN, CHN, NH_4, NH_2, а затем частичное окисление этих соединений по реакции

$$RN + O_2 \rightarrow NO + RO.$$

Топливные оксиды азота образуются параллельно с горением топлива в основной зоне горения за промежуток времени меньший, чем время горения топлива. Из-за малой энергии активации процесс образования NO из азота топлива происходит уже при относительно низких температурах (t >= 1000 °C). Зависимость выхода топливных оксидов азота от содержания молекулярного кислорода в зоне горения близка к квадратичной. Естественно, важным фактором здесь является содержание азота в топливе.

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

Образование «быстрых» NO_x

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

$$N_2 + CH \rightarrow HCN + N;$$

$$N + OH \rightarrow NO + H.$$

Эти реакции активно протекают уже при температуре около 1300 °C, когда образование термических NO еще не происходит. Концентрация «быстрых» NO растет при увеличении избытка воздуха и температуры и при сжигании природного газа может составить 70–90 мг/м^3. С этим приходится считаться при разработке мероприятий по подавлению образования NO_x в целях достижения современных норм по выбросу NO_x в атмосферу.

Библиотека ГГТУ им. П.О.Сухого

3.3. Первичные мероприятия, направленные на уменьшение выбросов NO_x

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

1. Использование горелок с низким выбросом NO_x (снижение NO_x до 60 %).
2. Ступенчатое сжигание топлива (снижение NO_x до 35–45 %).
3. Рециркуляция дымовых газов (снижение NO_x до 33 %).
4. Впрыск воды в ядро факела (снижение NO_x до 25–44 %).
5. Комбинацию первичных мероприятий (снижение NO_x до 90 %).

Первичные мероприятия малозатратны и поэтому их применяют прежде всего для обеспечения нормируемых выбросов оксидов азота.

Горелки с низким выбросом NO_x

У горелок с низким выбросом NO_x, которые созданы в многочисленных вариантах, организована ступенчатая подача воздуха. Принцип работы такой горелки: в ядро факела подается количество воздуха, недостаточное для обеспечения полноты горения (кислородный голод) в то время как во внешнюю зону горения подается избыточное количество воздуха, чтобы обеспечить полноту сгорания топлива. Кроме того, конструкция горелки (рис. 3.2) позволяет поддерживать рециркуляцию воздуха внутри зоны горения.

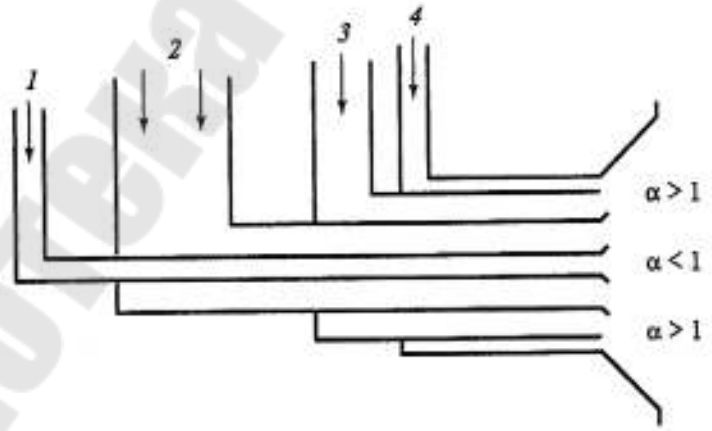


Рис. 3.2. Принципиальная схема пылеугольной горелки с низким выбросом NO_x: *1* – первичный воздух; *2* – пылевоздушная смесь; *3* – вторичный воздух; *4* – третичный воздух

Библиотека ГГТУ им. П.О. Сухого

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

Ступенчатое сжигание топлива

При ступенчатом сжигании топлива горелки в топке котла размещают в несколько ярусов (обычно 3–4 яруса). Подача воздуха (избыток воздуха) изменяется поярусно.

Наилучший эффект дает *трехступенчатое сжигание*. Суть его в том, что по высоте топочной камеры организуют три зоны (рис. 3.3). В первой (нижней) зоне топки сжигается основное количество топлива (70–85 %) при избытке воздуха, близком к единице. На выход из зоны активного горения подается остальная часть топлива (15–30 %) и соответствующее количество воздуха с таким расчетом, чтобы суммарный избыток воздуха в ней составлял 0,9–0,95 % (т. е. небольшой недостаток для полного сжигания топлива), благодаря чему в этой части топки создается зона восстановления оксидов азота NO до NO_2.

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

Рис. 3.3. Принципиальная схема трехступенчатого сжигания топлива в топке

Библиотека ГГТУ им. П.О. Сухого

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

Рециркуляция дымовых газов

Рециркуляция дымовых газов из конвективной шахты в тракт воздуха осуществляется с помощью дополнительного дымососа рециркуляции газов (рис. 3.4).

Для улучшения перемешивания газов рециркуляции с воздухом, который поступает в топочную камеру, устанавливают смесители. Доля рециркулирующих газов снижаются концентрация кислорода в зоне горения топлива и температура горения.

Уменьшение выбросов оксидов азота при использовании данного метода в среднем составляет: при сжигании угля до 25 %, при сжигании мазута – до 30 %, при сжигании природного газа – до 33 %.

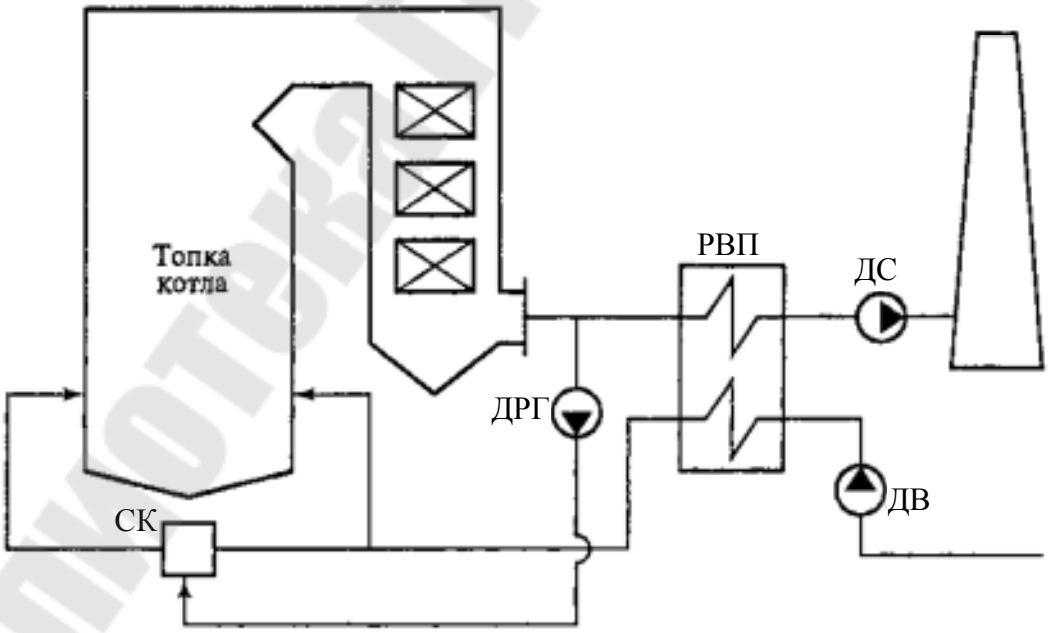


Рис. 3.4. Принципиальная схема рециркуляции дымовых газов котла с использованием дымососов рециркуляции газов

Библиотека ГГТУ им. П.О. Сухого

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

Впрыск воды в ядро факела

Впрыск воды в ядро факела снижает температуру в нем и тем самым препятствует образованию термических оксидов азота. Количество впрыскиваемой воды составляет около 10 % расхода топлива. Этот способ применяется в основном в период неблагоприятных метеоусловий в районах с повышенной фоновой концентрацией вредных веществ.

Этот способ снижает выбросы NO_x примерно на 25 % и одновременно снижает КПД котла приблизительно на 0,7 %. Эффективность впрыска воды в топку существенно уменьшается, если котел работает с рециркуляцией дымовых газов или в режиме ступенчатого сжигания топлива. По этой причине метод впрыска не получил широкого применения.

Комбинация первичных мероприятий

В настоящее время для снижения выбросов NO_x при сжигании твердого топлива используются комбинации следующих первичных мероприятий: использование специальных горелок, ступенчатая подача воздуха и топлива, рециркуляция дымовых газов, предварительный подогрев угольной пыли, подача пыли высокой концентрации и др. С их помощью на ТЭС уже достигнута концентрация NO_x 450–550 мг/м с котлами, сжигающими каменные угли и концентрация 300–350 мг/м с котлами, сжигающими бурые угли.

Из анализа приведенных выше данных можно сделать следующие выводы:

– на котлах, в которых сжигается газ, можно при использовании первичных мероприятий получить концентрации оксидов азота, приближающиеся к требуемым для экологически безопасных ТЭС (150–200 мг/м^3);

Библиотека ГГТУ им. П.О. Сухого

– на котлах, в которых сжигаются мазут и твердое топливо, для получения экологически безопасных показателей выбросов NO_x необходимо использование вторичных мероприятий.

При использовании малозатратных методов подавления NO_x при сжигании природного газа в случае неполного сгорания топлива могут образовываться угарный газ CO, углеводороды CH_4, C_2H_6, а также канцерогенные вещества. Продукты неполного сгорания топлива весьма вредны. Проблема изучения канцерогенных веществ, образующихся при неполном сгорании топлива, в последнее время привлекла серьезное внимание специалистов. По своей распространенности и интенсивности воздействия из многих химических веществ этого типа наибольшее значение имеют полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) и наиболее активный из них бенз(а)пирен $C_{20}H_{12}$. Максимальное количество бенз(а)пирена образуется в топках при температуре 700–800 °С в условиях нехватки воздуха для сгорания топлива.

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

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

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

Библиотека ГГТУ им. П.О.Сухого

3.4. Вторичные мероприятия по уменьшению выбросов NO_x

Селективные системы очистки дымовых газов от NO_x

Для очистки дымовых газов котлов от оксидов азота используют селективный некаталитический (СНКВ) и каталитический (СКВ) методы восстановления NO_x до молекулярного азота. *Каталитические методы* обезвреживания газов позволяют эффективно проводить очистку газов от оксидов азота.

Общую схему каталитических методов восстановления можно представить в следующем виде:

$$NO_x \xrightarrow{\text{восстановление}} N_2 + H_2O.$$

В них в качестве восстановителя применяется аммиак. Некаталитические системы проще, их сооружение обходится не дороже замены горелок, а эффективность достаточно высока: выбросы оксидов азота снижаются на 40–60 %. Аммиак (аммиачная вода, карбамид) вводится в высокотемпературную (900–1100 °С) область газохода котла с газами рециркуляции, воздухом или паром. Сочетание технологических методов подавления оксидов азота с методом СНКВ при сжигании угля позволяет снизить концентрации оксидов азота в дымовых газах до 300 мг/м^3.

В странах Европы, в США и Японии системы СКВ и СНКВ на крупных угольных энергоблоках применяются достаточно часто. По мере ужесточения нормативов выбросов NO_x и снижения стоимости подобных систем последние могут оказаться конкурентоспособными по сравнению с реконструкцией системы горения в целях снижения образования NO_x.

Важнейшей тенденцией является объединение этих двух технологий (СКВ и СНКВ). Этот процесс может осуществляться по следующей схеме: подача аммиака или мочевины в высокотемпературную зону (система СНКВ) приводит к частичному восстановлению NO_x и повышению содержания аммиака в дымовых газах. Путем добавления в газоходы небольшого количества катализатора за счет аммиака удается обеспечить дополнительное восстановление NO_x. Катализатор в этом случае размещают на поверхности воздухоподогревателя.

Библиотека ГГТУ им. П.О. Сухого

По сравнению с СКВ для системы СНКВ не нужны значительные инвестиционные затраты, однако эффективность этой системы очистки заметно ниже.

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

При практической реализации системы СНКВ возникает ряд трудностей:

1) невозможно обеспечить оптимальную температуру дымовых газов по всему сечению газохода;

2) невозможно предотвратить изменение температуры в реакционной зоне при изменении нагрузки котла;

3) недостаточна протяженность реакционной зоны для обеспечения необходимого времени протекания реакции;

4) невозможно распределить аммиак по сечению газохода так, чтобы везде соотношение NH_3/NO_x было близко к оптимальному.

Таким образом, эффективность очистки зависит от конструктивных особенностей котла и его размеров.

Система каталитического восстановления NO_v является наиболее эффективной и освоенной для уменьшения содержания оксидов азота в дымовых газах мощных паровых котлов. За рубежом она получила название технологии DENOX.

Уходящие газы содержат большое количество самых различных химических соединений. Система каталитического восстановления основана на том, что вводимый в поток газов химический реагент взаимодействует преимущественно с NO_x. Хорошей избирательностью (селективностью) для уменьшения содержания NO_x в уходящих газах обладает аммиак NH_3. Однако химические реакции аммиака с NO и NO_2 эффективно протекают только при весьма высокой температуре (900–1000 °С).

Для снижения температуры используют катализаторы.

К катализаторам предъявляются следующие требования:

1) высокая активность восстановления NO_x в N_2 в ширкоком диапазоне температур;

2) высокая избирательность (селективность) по NO_x;

3) низкая активность реакций с оксидами серы;

Библиотека ГГТУ им. П.О. Сухого

4) устойчивость против истирания твердыми частицами и отравления катализатора;

5) длительный ресурс.

Этим требованиям отвечают следующие материалы:

1) оксиды титана, алюминия или кремния в пористом виде;

2) смеси оксидов ванадия, молибдена, вольфрама, а также ряда других металлов.

Каталитическая активность в реакциях восстановления убывает в ряду

$$Pt > MnO_2 > V_2O_5 > CuO > Fe_2O_3 > Cr_2O_3 > CoO_3.$$

Установки, реализующие метод СКВ (СКВ-установки), имеют максимальную эффективность в интервале температур газов 340–380 °С. При температурах дымовых газов ниже 340 °С увеличивается интенсивность нежелательных реакций (например, NH_3 с O_2). При температуре 450 °С и выше возникает опасность значительного снижения эффективности работы катализатора.

Эффект очистки дымовых газов характеризуется степенью очистки, %, определяемой по формуле

$$RNO_x = [(C_{вх}NO_x - C_{вых}NO_x)/ C_{вх}NO_x]\ 100\ \%,$$

где $C_{вх}NO_x$ и $C_{вых}NO_x$ – концентрации NO_x на входе в катализатор и выходе из него.

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

Адсорбционные методы

Адсорбционные методы – одни из самых распространенных средств защиты воздушного бассейна от загрязнений. Область применения современных адсорбентов в процессах очистки газов очень широка.

Основными промышленными адсорбентами являются активированные угли, сложные оксиды и импрегнированные сорбенты.

Активированный уголь (АУ) нейтрален как к полярным, так и к неполярным молекулам адсорбируемых соединений. Активированные угли обладают меньшей селективностью, чем другие адсорбенты и являются одними из немногих, пригодных для работы во влажных газовых потоках.

Библиотека ГГТУ им. П.О. Сухого

Адсорбция молекул газообразного вещества на поверхности твердого адсорбента сопровождается выделением тепла, количество которого зависит от природы образующихся связей между молекулами адсорбируемого вещества и адсорбента. Различают физическую и химическую адсорбцию (хемосорбцию). В последнем случае теплота адсорбции значительно выше, чем в первом, что создает дополнительные проблемы перегрева адсорбента в ходе очистки газов и усложняет аппаратурное оформление процесса.

Для десорбции примесей применяют нагревание адсорбента, вакуумирование, продувку инертным газом, вытеснение примесей более легко адсорбирующимся веществом, например, водяным паром. В последнее время особое внимание уделяется десорбции примесей путем вакуумирования. При вакуумировании системы и непрямом нагреве удается утилизировать выделяющиеся примеси.

Для проведения процессов адсорбции разработаны различные технологии. Наибольшее распространение имеют *адсорберы с неподвижным слоем* гранулированного или сотового адсорбента.

Процессы непрерывного осуществления адсорбции с регенерацией адсорбента в отдельных аппаратах позволяют создавать системы с *движущимся зернистым слоем* адсорбента, через который непрерывно фильтруется газовая смесь. Отдельно можно выделить адсорберы с «текущим» адсорбентом. В зависимости от мест ввода и вывода частиц возможна организация «течения» адсорбента по различным линиям движения. Достаточно распространены также адсорберы с движущимся плотным слоем адсорбента.

Различными фирмами ведущих в этой области стран: Германии, Японии, США – создано более 50 разновидностей процессов сухой и мокрой очистки дымовых газов. Наибольшее число фирменных разработок приходится на долю процессов *сухой* очистки, особенно селективного восстановления с помощью аммиака.

Общий недостаток, характерный для всех технологий, основанных на методах сухой очистки дымовых газов, заключается в том, что на всех стадиях технологической цепочки приходится иметь дело с большими объемами очищаемого газа (1 млн $м^3$/ч газа и более). Следствием этого являются крупногабаритные аппараты, требующие больших капитальных вложений. При использовании жидкофазных методов очистки аппараты больших объемов необходимы только на стадии промывки газа, на последующих стадиях, связанных с утилизацией извлекаемых из дымовых газов продуктов, – относительно небольших объемов.

Библиотека ГГТУ им. П.О. Сухого

Тема 4. ВЫБРОСЫ СОЕДИНЕНИЙ СЕРЫ С ДЫМОВЫМИ ГАЗАМИ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ В АТМОСФЕРУ

4.1. Влияние оксидов серы на окружающую среду
4.2. Очистка топлива от соединений серы до его сжигания
4.3. Очистка топлива от соединений серы в процессе горения
4.4. Очистка дымовых газов от соединений серы

4.1. Влияние оксидов серы на окружающую среду

Одной из самых острых проблем в защите окружающей среды является сокращение выбросов окислов серы от ТЭС и котельных, сжигающих серосодержащее топливо. При сжигании серосодержащего топлива образуются два оксида серы: сернистый ангидрид SO_2 и серный ангидрид SO_3.

Наиболее чувствительны к воздействию SO_2 растения. Токсичное воздействие SO_2 связано с повреждением поверхности листьев или хвои из-за разрушения содержащегося в них хлорофилла. Лиственные растения, ежегодно сбрасывающие листву, менее подвержены действию SO_2. Хвойные растения, наоборот, сильнее подвержены влиянию токсических примесей.

Проведенные исследования влияния содержания SO_2 в атмосферном воздухе на состояние хвойных деревьев показали, что при концентрации сернистого газа в воздухе от 0,23 до 0,32 мг/ м^3 происходит нарушение фотосинтеза и дыхания хвои, что вызывает усыхание, например, сосны за 2–3 года. При содержании сернистого газа в воздухе от 0,08 до 0,23 мг/ м^3 происходит уменьшение интенсивности фотосинтеза без уменьшения интенсивности дыхания хвои, что приводит к медленному усыханию деревьев. Изменения в ассимиляции лиственных деревьев начинают ощущаться при концентрации SO_2 более 0,5–1 мг/м^3.

Одно из возможных отрицательных воздействий атмосферных загрязнений на людей связано с образованием туманов, возникающих при резком возрастании концентрации атмосферных загрязнений и неблагоприятных метеоусловиях.

Действие токсических веществ, загрязняющих атмосферу, может вызвать хронические неспецифические заболевания. Среди этих

Библиотека ГГТУ им. П.О.Сухого

заболеваний существенное значение приобретают атеросклероз и связанные с ним коронарные и дегенеративные заболевания сердца, хронический бронхит, эмфизема, бронхиальная астма и пр. Во многих исследованиях присутствует так называемый «городской градиент» при относительно низких показателях заболеваемости сельского населения. Выполненные исследования позволили установить, что основное влияние на рост заболеваний в городах оказывают такие факторы, как плотность населения и загрязнение внешней среды, в частности, атмосферного воздуха.

Если среднегодовая концентрация SO_2 или взвешенных частиц в атмосферном воздухе составляет 0,08–0,10 мг/м^3, то ухудшается видимость, возникает дискомфорт, появляются симптомы ухудшения дыхания; если концентрация SO_2 или взвешенных частиц в течение суток составляет 0,25–0,5 мг/м^3, то ухудшается состояние пациентов с легочными заболеваниями, повышаются обращаемость людей в больницу, их смертность.

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

С учетом всех последствий попадания диоксида серы в окружающую среду современной считают такую ТЭС, которая имеет необходимые газоочистные сооружения, обеспечивающие производство экологически чистой энергии.

Наличие в дымовых газах диоксида серы обусловлено постоянным присутствием в твердом и жидком топливе (и в природном газе некоторых месторождений) различных соединений серы – сульфидов и органических соединений.

При окислительном сжигании топлива сера окисляется до диоксида

$$S + O_2 \rightarrow SO_2 .$$

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

Библиотека ГГТУ им. П.О. Сухого

$$2H_2S + 3O_2 \rightarrow 2SO_2 + 2H_2O.$$

Месторождения высокосернистых углей находятся в России в европейской части страны и на Урале. Угли Сибири и Дальнего Востока обычно имеют малое содержание серы. Энергетические мазуты содержат 2–3,5 % серы.

Рост производства электроэнергии и наметившиеся изменения в структуре топливного баланса в сторону увеличения доли твердого топлива приведут к росту выбросов SO_2 в атмосферу. В отношении защиты окружающей природной среды снижение выбросов соединений серы на ТЭС становится актуальнейшей задачей.

Сокращение выбросов соединений серы на ТЭС может быть осуществлено *тремя способами*:

1) путем очистки топлива от соединений серы до его сжигания;
2) связыванием серы в процессе горения;
3) в результате очистки дымовых газов.

4.2. Очистка топлива от соединений серы до его сжигания

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

При *прямом методе очистки* жидкое топливо проходит обработку путем каталитического гидрирования с выделением серы в виде сероводорода и последующим восстановлением его до элементарной серы. Стоимость такой обработки составляет около 7 дол. США за тонну топлива при глубине сероочистки от 3 до 1,0 %.

Метод косвенной очистки заключается в вакуумной перегонке топлива. Стоимость такой сероочистки составляет примерно 7,5–9,0 дол. за тонну топлива при глубине сероочистки от 3 до 0,6 %.

В твердом топливе (ископаемом угле) сера может находиться в виде органической и (или) колчеданной серы.

Основную часть колчеданной серы (FeS_2) можно достаточно легко удалить путем обогащения, поскольку она находится в углях в виде отдельных включений.

Сложнее обстоит дело с органической серой, ибо она входит в состав горючей массы и удалить ее очень сложно. В настоящее время методы удаления органической серы из твердого топлива находятся в стадии разработки.

Библиотека ГГТУ им. П.О.Сухого

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

Процесс газификации угля происходит по следующей химической реакции:

$$C + H_2O \rightarrow CO + H_2 .$$

При этом КПД газификации составляет 80–85 %. Под КПД газификации здесь понимается отношение массы образующихся газов к горючей массе исходного твердого топлива.

4.3. Очистка топлива от соединений серы в процессе горения

Наиболее распространенным способом связывания серы в процессе горения является способ сжигания углей в кипящем слое. Применение *кипящего* (*псевдоожиженного*) *слоя* при сжигании сернистых углей позволяет значительно уменьшить содержание оксидов серы и азота в дымовых газах. Для образования кипящего слоя на неподвижной решетке, через которую подается воздух под давлением, используется смесь дробленого угля с размерами частиц 1,5–6 мм, инертного материала (песка, золы и др.) и известняка. Под действием восходящего потока воздуха образуется суспензионный кипящий слой. Одновременно с процессом горения протекает процесс десульфуризации, поскольку в кипящий слой непрерывно вводится известняк, который состоит в основном из $CaCO_3$.

Реакция десульфуризации протекает при температуре t = 800–850 °С в следующей последовательности:

$$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2 ;$$

$$CaO + SO_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CaSO_4 .$$

Библиотека ГГТУ им. П.О. Сухого

В результате реакции образуется гипс. Эффективность удаления серы в этом случае зависит от количества известняка. Поддержание соотношения Ca/S примерно в 1,5 раза больше стехиометрического, по зарубежным данным позволяет на 80 % связать SO_2 и на выходе из топки получать его концентрацию до 200 мг/м^3.

Оптимальная температура процесса горения составляет приблизительно 850 °С, что позволяет резко снизить образование оксидов азота. Реализация этого способа сжигания топлива дает ряд и других преимуществ. Так, трубы поверхностей нагрева котла, находящиеся в непосредственном контакте с кипящим слоем, имеют коэффициент теплоотдачи к ним более высокий, чем при радиационном теплообмене.

Но главным достоинством этого способа сжигания топлива является все же связывание более 80 % серы.

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

Принципиальная схема парового котла с топкой ЦКС, работающего при атмосферном давлении, показана на рис. 4.1.

В топку с кипящим слоем подаются известняк, песок, гранулированная зола или другой зернистый материал, образующий с дробленым углем плотный суспензионный кипящий слой под действием восходящего потока воздуха, поступающего через решетку в нижней части топки. Горючие вещества сгорают при 760–980 °С. При такой температуре зола не спекается и не размягчается и процесс горения протекает эффективно. Процесс десульфуризации топочных газов идет одновременно с процессом горения. Продукты сгорания поднимаются в верхнюю часть топки и попадают в циклон. Из циклона инертная масса, несгоревшие частицы топлива и непрореагировавший известняк возвращаются обратно в топку. Трубы поверхностей нагрева располагаются в кипящем слое и в конвективной шахте. Для подачи воздуха под раздающую плиту используется высоконапорный дутьевой вентилятор.

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

Библиотека ГГТУ им. П.О.Сухого

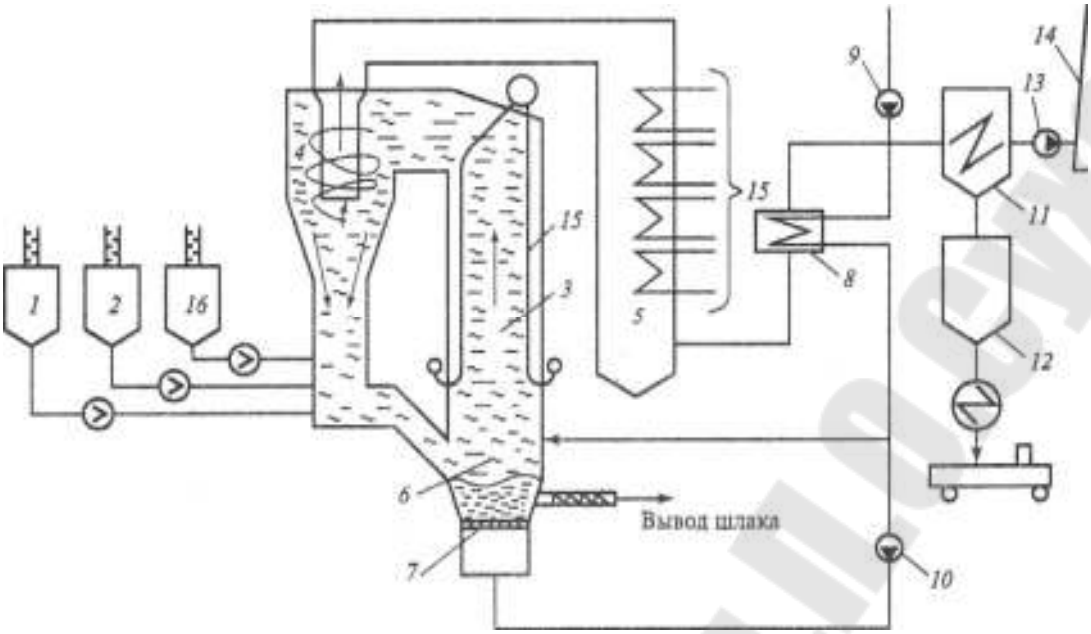


Рис. 4.1. Схема котла с топкой с циркулирующим кипящим слоем при атмосферном давлении (не под наддувом): *1* – бункер известняка; *2* – бункер топлива; *3* – топка котла; *4* – циклон; *5* – опускная конвективная шахта; *6* – кипящий слой; *7* – воздухоразделяющая плита; *8* – РВП; *9* – дутьевой вентилятор; *10* – высоконапорный вентилятор; *11* – электрофильтр; *12* – бункер золы; *13* – дымосос; *14* – дымовая труба; *15* – теплообменные поверхности; *16* – бункер с инертным телом

К достоинствам топок с ЦКС в отношении экологии следует отнести высокую степень связывания SO_2 и снижение концентрации NO_x в уходящих газах. Недостатком является увеличение золоотвала на объем известняка, используемого для связывания серы.

Опыт освоения котельных установок с ЦКС составляет в настоящее время 15–20 лет. Экологические показатели таких установок весьма высокие, они зависят, в основном, от избытка воздуха в топке: чем он выше, тем лучше связывается SO_2 и меньше образуется угарного газа CO.

4.4. Очистка дымовых газов от соединений серы

Первая опытная установка по очистке дымовых газов от оксидов серы была пущена в 1938 г. на Каширской ГРЭС. На ней отрабатывалась технология циклического магнезитового способа с получением концентрированного сернистого газа. С началом Великой Отечественной войны работы на установке были прекращены.

Библиотека ГГТУ им. П.О. Сухого

В дальнейшем изучение процессов очистки дымовых газов ТЭС от диоксида серы было продолжено лишь в 60-е годы прошлого века.

Ниже рассматриваются основные характеристики наиболее распространенных в мировой практике технологий сероочистки.

Мокроизвестняковый способ очистки дымовых газов от SO_2

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

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

$$CaCO_3 + SO_2 \rightarrow CaSO_3 + CO_2 .$$

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

$$CaSO_3 + \frac{1}{2}O_2 + 2H_2O \rightarrow CaSO_4 \cdot 2H_2O .$$

Схема включения сероочистки, работающая по МИС, включенная в систему газоходов котельного агрегата, представлена на рис. 4.2.

Дымовые газы после электрофильтра и дымососа *1* направляются через регенеративный газовый подогреватель (РГП) *3* к промывочной башне *4*. Необходимость охлаждения дымовых газов перед промывочной башней вызвана тем, что взаимодействие карбоната кальция $CaCO_3$ с диоксидом серы SO_2 происходит эффективно только при относительно низких температурах (приблизительно 50 °С). В то же время температура уходящих газов перед дымовой трубой должна быть не ниже 70–80 °С. Для регулирования температуры уходящих газов предусмотрена байпасная линия *6*. Для подачи очищенных газов в дымовую трубу используется вспомогательный дымосос 2. Принципиальная схема установки МИС с абсорбером представлена на рис. 4.3.

Библиотека ГГТУ им. П.О.Сухого

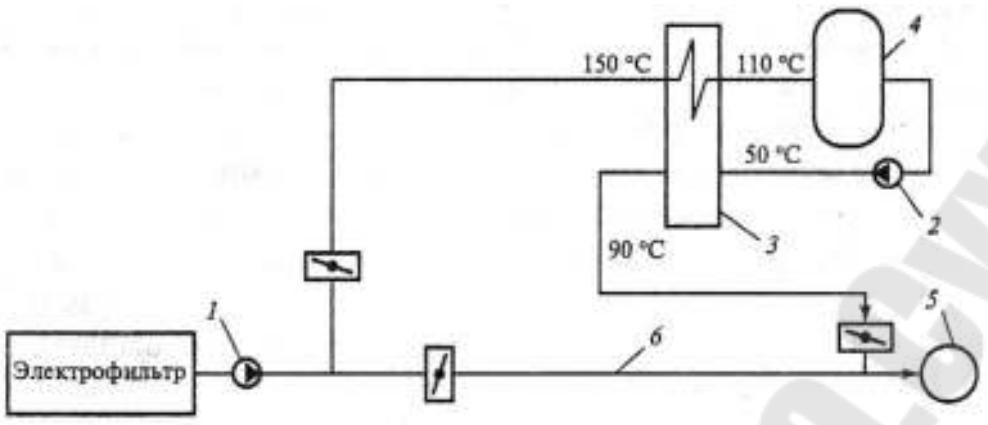


Рис. 4.2. Принципиальная схема включения сероочистки, работающая по микроизвестковому способу очистки: *1*, *2* – дымососы; *3* – регенеративный газовый подогреватель; *4* – промывочная башня (абсорбер или скруббер); *5* – дымовая труба; *6* – байпасная линия

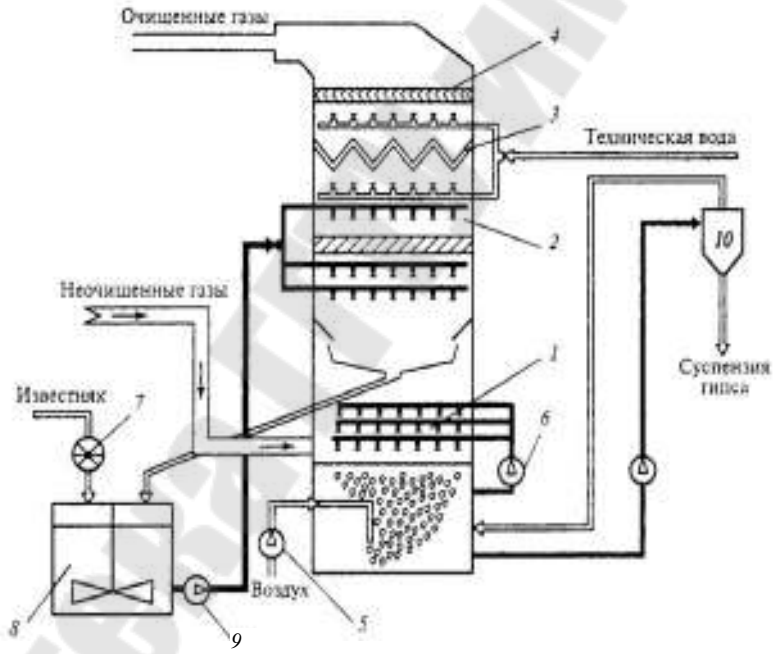


Рис. 4.3. Принципиальная схема установки для удаления серы по мокроизвестковому способу очистки: *1* – первая зона очистки газов в слое частично обработанного известняка; *2* – вторая зона очистки газов в слое свежей известняковой суспензии; *3* – зона промывки газов от механических частиц; *4* – каплеуловитель; *5* – воздуходувка; *6* – циркуляционный насос; *7* – дробилка извести; *8* – мешалка; *9* – насос подачи известняковой суспензии; *10* – гидроциклон

Основным элементом МИС является абсорбер. Дымовые газы поступают в нижнюю часть абсорбера и движутся снизу вверх, про-

Библиотека ГГТУ им. П.О. Сухого

ходя последовательно две зоны очистки: первую *1*, где происходит реакция связывания SO_2 последовательно в слое частично отработанного известняка, и вторую *2*, где очистка осуществляется в зоне свежей известняковой суспензии. Затем газы проходят зону промывки технической водой *3*, где удаляются механические включения. Далее очищенный газ подается в каплеуловитель *4*, где он практически полностью освобождается от капель воды. Образовавшиеся частицы $CaSO_3$ поступают в нижнюю часть абсорбера, где в результате барботажа воздуха доокисляются в гипс. Из нижней части абсорбера суспензия гипса подается в гидроциклон *10*, в котором происходит отделение суспензии гипса от воды, а более мелкие частицы известняка с водой возвращаются в абсорбер. Для повышения эффективности связывания SO_2 и снижения расхода известняка в абсорбере обеспечена многократная циркуляция известняковой суспензии с помощью циркуляционного насоса *6*.

К недостаткам МИС следует отнести большое количество образующихся минерализованных сточных вод и большие размеры установки. Однако основным недостатком способа являются большие капитальные затраты, составляющие 150–200 дол. на 1 кВт установленной мощности; также возрастает расход электроэнергии на собственные нужды ТЭС (на 3–5 %). Еще один недостаток – большой дополнительный расход технической воды.

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

Обычно башенный абсорбер устанавливают за электрофильтром, что обеспечивает высокую чистоту гипса.

Данный способ сероочистки получил широкое распространение в Германии в связи с очень высокой степенью связывания SO_2 и возможностью получения ценного конечного товарного продукта. В США с 1978 г. установка скрубберов похожего типа стала обязательной для всех строящихся ТЭС на пылевидном топливе. В результате этого в энергетике США сейчас больше скрубберных установок, чем во всех остальных странах. В отличие от Германии в США в ряде случаев не производят товарный гипс, а ограничиваются получением инертного сульфита кальция, который в дальнейшем поступает на захоронение.

Библиотека ГГТУ им. П.О.Сухого

Утилизация гипсовых шламов

В мировой практике накоплен значительный опыт использования гипсосодержащих отходов.

Из гипса получают алебастр ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), применяемый в строительстве как вяжущее средство. Для этого его обжигают в печах при температуре 150–170 °С, где происходит следующая реакция:

$$2(CaS0_4 \cdot 2H_2O) + Q \rightarrow 2\left(CaS0_4 \cdot \frac{1}{2}H_2O\right) + H_2O.$$

Гипсовый шлам в виде гипсовой муки может быть применен в сельском хозяйстве для гипсования почв. Обработка солонцовых почв гипсом проводится для замены поглощенного натрия кальцием, что улучшает физические свойства почв и повышает их плодородие

Гипсовый шлам водоподготовительной установки может быть использован также в качестве добавок при производстве гипсовых изделий. При этом основным критерием помимо качества самого шлама будет являться стоимость его транспортировки к месту использования.

Возможно применение шлама в цементной промышленности в качестве минерального наполнителя и замедлителя схватывания.

Наиболее универсален вариант переработки шлама в гипсовое вяжущее вещество. Известно, что для получения вяжущего вещества из гипса нужно удалить определенное количество кристаллизационной воды.

Испытания полученных гипсовых вяжущих подтвердили их пригодность для получения ряда строительных изделий: перегородочных плит, декоративных плит, подстилающего слоя в наливных полах, монолитного бетона для малоэтажного строительства, штукатурных растворов и стеновых камней по мокрой технологии.

Отмечен ряд преимуществ полученных вяжущих по сравнению с вяжущими из наиболее распространенного природного сырья:

– светлая окраска, дающая возможность получать чистые цвета изделий при объемном окрашивании;

– хорошие формующие свойства, позволяющие получать изделия с тонким и глубоким рельефом;

– возможность получать вяжущие с широкой гаммой по прочности и срокам схватывания при небольшой разнице между началом и

Библиотека ГГТУ им. П.О.Сухого

концом схватывания, что имеет особую ценность на строительной площадке.

Мокросухой способ очистки дымовых газов от SO_2

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

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

$$Ca(OH)_2 + SO_2 \rightarrow CaSO_3 + H_2O;$$

$$Na_2CO_3 + SO_2 \rightarrow Na_2SO_3 + CO_2.$$

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

Структурная схема мокросухого способа очистки дымовых газов от SO_2 представлена на рис. 4.4.

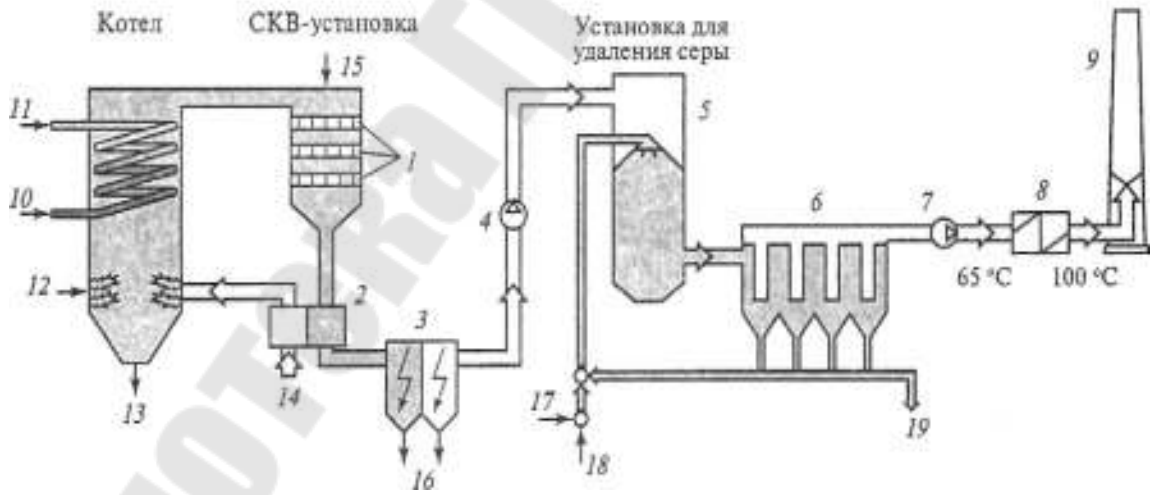


Рис. 4.4. Схема мокросухого способа очистки дымовых газов от SO_2: *1* – катализатор; *2* – РВП; *3* – электрофильтр; *4*, *7*– дымососы; *5* – абсорбер; *6* – тканевый фильтр; *8* – подогреватель; *9* – дымовая труба; *10* – питательная вода; *11*– пар; *12* – угольная пыль; *13* – зола; *14* – воздух; *15* – впрыск аммиака; *16* – летучая зола; *17* – известь; *18* – вода; *19* – продукты реакции (сульфит и сульфат кальция)

Библиотека ГГТУ им. П.О. Сухого

К преимуществам МСС относятся:

1) простота технологической схемы;

2) меньшие, чем при МИС, капитальные затраты;

3) меньший расход тепловой энергии на подогрев дымовых газов по сравнению со схемой МИС;

4) отсутствие сточных вод.

Недостатками способа являются:

– значительное энергопотребление (3–6 % мощности ТЭС);

– повышенный расход дорогих реагентов (извести или соды);

– низкое качество сухих отходов (отсутствие гипсовых вяжущих веществ);

– необходимость установки системы очистки дымовых газов от твердых частиц (продуктов реакций) после абсорбера.

Из-за этих недостатков МСС получил ограниченное применение.

Магнезитовый способ очистки дымовых газов от SO_2

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

$$MgO + SO_2 \rightarrow MgSO_3.$$

Полученный твердый сульфит магния обезвоживается и подвергается термическому разложению при температуре 900 °С с образованием концентрированного сернистого ангидрида SO_2 и оксида магния

$$MgSO_3 + Q \rightarrow MgO + SO_2.$$

Концентрированный SO_2 используется для приготовления серной кислоты или элементарной серы, MgO используется повторно.

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

Упрощенные малозатратные технологии сероочистки

Если содержание диоксида серы SO_2 в продуктах сгорания малосернистых углей близко к нормируемым значениям или если необходимо снизить выбросы оксидов серы только на 30–70 %, тогда для

Библиотека ГГТУ им. П.О. Сухого

этой цели можно рекомендовать использование малозатратных технологий сероочистки.

К ним, во-первых, относится связывание серы путем ввода известняка в верхнюю часть топки. Этот способ именуется сухой известняковой технологией (СИТ). Она основана на обжиге тонко размолотого известняка в топочной камере при температуре 1000–1100 °С до образования извести с последующим ее взаимодействием с диоксидом серы. Основные химические реакции этой технологии:

$$CaCO_3 + Q \rightarrow CaO + CO_2;$$

$$CaO + SO_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CaSO_4.$$

Схема установки сероочистки по СИТ показана на рис. 4.5.

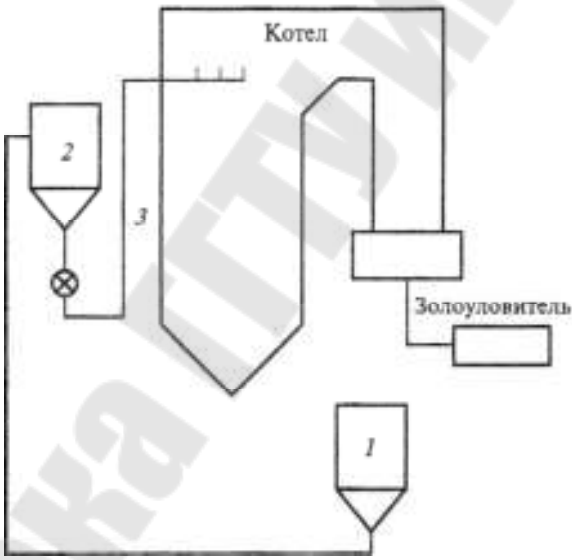


Рис. 4.5. Принципиальная схема сухой известняковой сероочистки:
1 – силосная башня для хранения размолотого известняка;
2 – расходный бункер; *3* – система пневмотранспорта известняка
в топку котла и его распределения в поперечном сечении
топочной камеры

Установка работает следующим образом. Размолотый известняк из стационарной силосной башни подают в расходный бункер, а из него – в верхнюю часть топочной камеры, где имеется зона с температурой дымовых газов 1000–1100 °С. Частицы известняка при этой температуре разлагаются с образованием активной извести, которая

Библиотека ГГТУ им. П.О. Сухого

взаимодействует с SO_2 при температуре газов около 850 °С. При температуре газов приблизительно 500 °С связывание диоксида серы прекращается, и летучая смесь золы с отходами сероочистки уходит с дымовыми газами в золоуловитель. В результате реакции образуется безводный гипс (ангидрид).

Технико-экономические показатели различных технологий сероочистки, полученные по данным фирм США представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1

Технико-экономические показатели различных технологий сероочистки по данным американских фирм

Показатель	Способ сероочистки			
	МИС	**МСС**	**СИТ**	**УМСС**
Содержание серы на рабочую массу в топливе S_p, %	2,0	0,5–2,0	0,5–1,0	0,3–0,8
Эффективность связывания SO_2, %	95–98	86–92	30–50	50–70
Удельные капитальные затраты, дол./кВт, установленной мощности	150–240	120–160	30–60	40–50
Стоимость удаления одной тонны SO_2, дол./т	500–550	450–650	530–650	350

Из таблицы можно сделать следующие выводы:

1) существующие технологии очистки дымовых газов от соединений серы позволяют осуществлять их очистку с высокой эффективностью;

2) наибольшую эффективность дает мокроизвестняковый способ, при котором степень сероочистки достигает 98 %;

3) наибольших капитальных затрат требует МИС сероочистки;

4) наибольшую эффективность дает мокроизвестняковый способ, при котором степень сероочистки достигает 98 %;

5) наибольших капитальных затрат требует МИС сероочистки.

Библиотека ГГТУ им. П.О. Сухого

Тема 5. ВЫБРОСЫ ВОДЯНОГО ПАРА В АТМОСФЕРУ

5.1. Система охлаждения конденсаторов турбин
5.2. Системы оборотного охлаждения с градирнями
5.3. Выбросы водяного пара с дымовыми газами в атмосферу

5.1. Система охлаждения конденсаторов турбин

Одним из выбросов в атмосферу от ТЭС является водяной пар. Он не оказывает непосредственного вредного влияния на организм человека, на животный и растительный мир. Однако он приводит к образованию тумана, наледи на сооружениях и дорогах, наросту льда на проводах, к обрыву линий электропередач. Выброс водяного пара отрицательно влияет на климатические условия, способствует ускорению процесса окисления с последующим образованием паров серной кислоты, а также образованию фотохимического тумана – смога. Как любой трехатомный газ он вносит свой вклад в парниковый эффект. Наличие над градирней парового облака приводит к снижению урожайности сельскохозяйственных культур.

Для регионов с дефицитом пресной воды ограничение образования водяных паров на ТЭС оправдано также с технико-экономической точки зрения.

Основными источниками выброса водяного пара в атмосферу от ТЭС являются система прямоточного или оборотного охлаждения (СПО или СОО) конденсаторов турбин и дымовые трубы.

Прямоточные системы технического водоснабжения на современных ТЭС практически не применяются из-за значительного роста единичных мощностей паротурбинных ТЭС и отсутствия крупных рек с достаточным дебетом воды. Отказ от прямоточного охлаждения для ТЭС обусловлен кроме технических причин экологическими факторами, не допускающими повышения температуры в реках более чем на 3–5 °С.

На ряде ТЭС применяется система оборотного охлаждения с прудами-охладителями, образуемыми при сооружении плотин на малых и средних реках. В этом случае испарение воды с поверхности пруда значительно меньше, поскольку большая доля отвода теплоты от циркуляционной воды происходит за счет контакта воды с воздухом при ее движении в границах акватории.

Библиотека ГГТУ им. П.О. Сухого

5.2. Системы оборотного охлаждения с градирнями

Широко применяется система оборотного охлаждения (СОО) с градирнями. Все чаще она используется и на конденсационных электростанциях (КЭС). Преимущественное распространение получили *противоточные градирни с естественной тягой* (рис. 5.1).

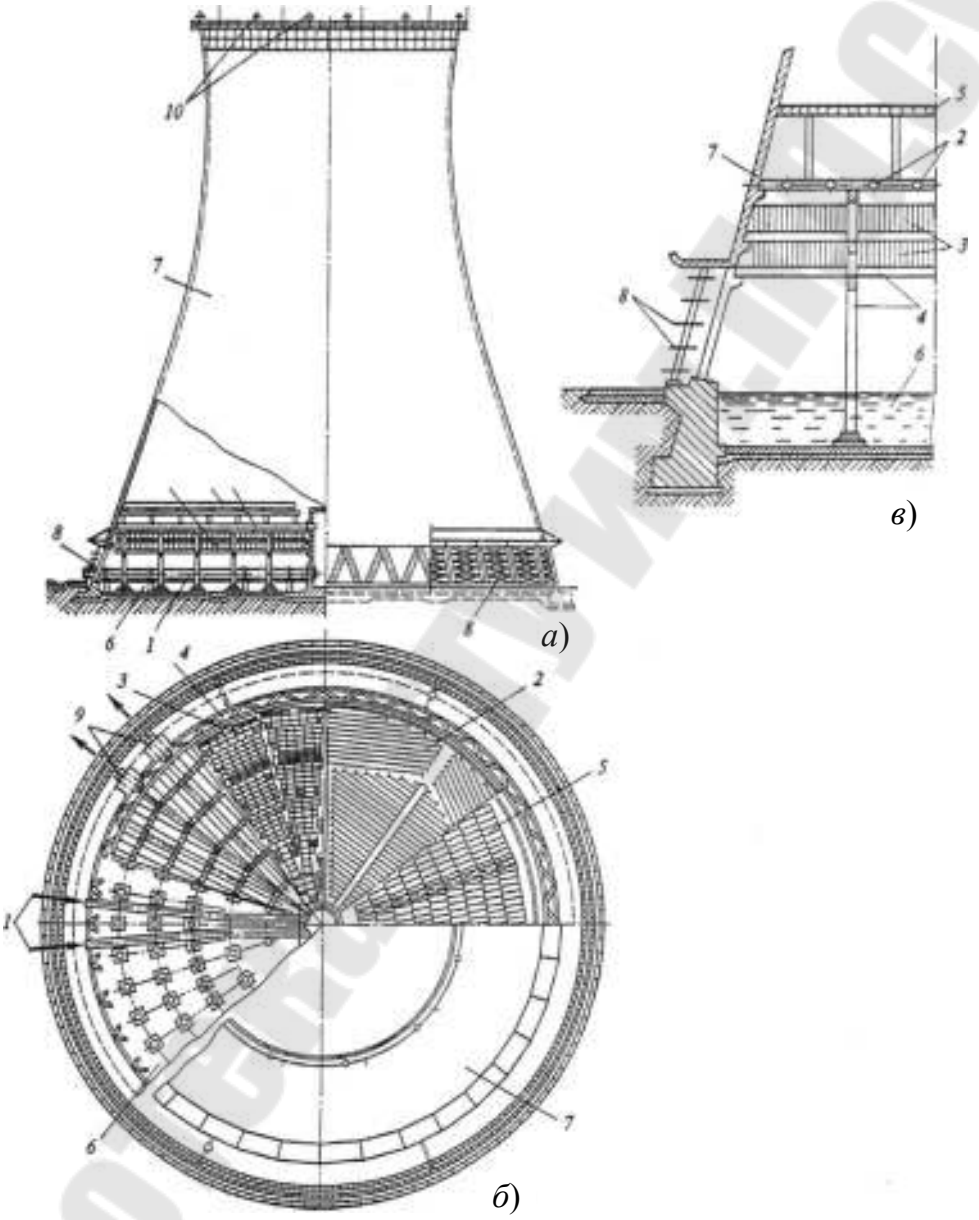


Рис. 5.1. Градирня противоточного типа с естественной тягой:
а – разрез и фасад; *б* – план; *в* – деталь; *1* – подводящие трубы;
2 – водораспределительные трубопроводы с разбрызгивающими соплами;
3 – щиты оросительного устройства пленочного типа; *4* – каркас оросителя;
5 – водоуловитель; *6* – водосборный бассейн; *7* – вытяжная железобетонная гиперболоидальная башня; *8* – воздухонаправляющие щиты;
9 – отводящие трубы; *10* – светоограждение

Библиотека БрГТУ

5.3. Выбросы водяного пара с дымовыми газами в атмосферу

Помимо градирен источником выбросов водяного пара от ТЭС являются дымовые газы котлов. Водяной пар образуется в результате сгорания топлива, содержащего влагу W^P и водород H^P. Особенно много H_2O содержится в продуктах сгорания природного газа, меньше – в продуктах сгорания мазута и еще меньше – в продуктах сгорания ископаемых углей. Водяной пар образуется в результате реакции горения в топке котла содержащегося в топливе водорода.

При теплофикационных энергоблоках общие выбросы водяного пара в атмосферу и выбросы его через градирни по сравнению с выбросами конденсационных установок существенно ниже. Кроме того, при работе теплофикационных блоков ТЭЦ на природном газе более 60 % водяного пара выбрасывается через дымовую трубу и лишь немногим менее 40 % пара поступает в атмосферу от градирен.

Из зарубежной и отечественной литературы известно применение технологий получения воды из водяного пара уходящих газов. Технологии основываются на использовании поверхностных, или так называемых контактных, теплообменников, в которых конденсация водяного пара из уходящих газов осуществляется на поверхности струй или капель воды, вводимой в поток дымовых газов котла. Такие технологии могут найти применение из-за возможности не только уменьшить расход технической воды, но и возвратить в цикл теплоту, затраченную в котле или камере сгорания топлива на испарение воды. Получаемую при этом воду необходимо очистить от загрязнений.

Схемы конденсации отработавшего пара турбин и охлаждения циркуляционной воды в сухих и полусухих градирнях представляют интерес в отношении уменьшения выбросов в атмосферу водяного пара.

Помимо систем циркуляционного водоснабжения конденсаторов паровых турбин с сухими градирнями в некоторых случаях могут быть полезными смешанные системы охлаждения с испарительно-сухой градирней (так называемая гибридная градирня). В этом случае используется комбинация испарительно-влажного охлаждения с сухим (воздушным).

Такие градирни могут оказаться эффективными для строительства экологически безопасных электростанций.

Библиотека ГГТУ им. П.О. Сухого

Тема 6. ВЫБРОСЫ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ ОТ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ В АТМОСФЕРУ

6.1. Влияние углекислого газа на климат Земли

6.2. Способы ограничения выброса углекислого газа в атмосферу от тепловых электрических станций

6.3. Сжигание ископаемых топлив с малым содержанием углерода

6.4. Энергосбережение

6.5. Использование возобновляемых источников энергии

6.6. Теплофикация

6.7. Реализация технических решений, повышающих коэффициент полезного действия тепловых электрических станций как путь снижения выбросов CO_2

6.1. Влияние углекислого газа на климат Земли

В результате сжигания ископаемых топлив на Земле возникает ежегодный прирост на 15 млрд т CO_2 сверх сбалансированного круговорота, что способствует образованию так называемого парникового эффекта. На долю ТЭС приходится 22 % общих мировых выбросов CO_2.

По данным, приведенным Международным совещанием экспертов, необходимо к 2050 г. в мировом масштабе обеспечить сокращение выбросов CO_2 в атмосферу примерно на 60 %, чтобы не произошло глобального изменения климата Земли. В то же время расчеты Мирового энергетического совета показывают, что к 2020 г. произойдет увеличение выбросов CO_2 в атмосферу более чем на 40 %.

В интересах развития человечества требуется своевременная разработка экономически, экологически и технологически приемлемой структуры энергопроизводства как отдельных стран, так и мирового хозяйства в целом.

Библиотека ГГТУ им.П.О.Сухого

6.2. Способы ограничения выброса углекислого газа в атмосферу от тепловых электрических станций

Уменьшить выбросы CO_2 значительно сложнее, чем выбросы других вредных веществ. Очистка уходящих газов ТЭС от углекислого газа аппаратными средствами (например, с помощью абсорбционной или мембранной технологии) на сегодняшний день исключительно дорога, нецелесообразна и не находит применения. Однако, учитывая необходимость решения данной проблемы, в индустриально развитых странах ведутся работы и в этом направлении.

Реальное уменьшение выбросов углекислого газа от ТЭС дают:

1) сжигание ископаемых топлив с малым содержанием углерода (природный газ);

2) использование энергоносителей, не содержащих углерод (ядерное топливо);

4) энергосбережение;

3) использование возобновляемых источников энергии;

5) теплофикация;

6) реализация технических решений, повышающих КПД ТЭС.

Рассмотрим последовательно эти направления и их возможности.

6.3. Сжигание ископаемых топлив с малым содержанием углерода

Основным ископаемым топливом с малым содержанием углерода является природный газ, в состав которого преимущественно входит метан CH_4 (объемная концентрация 90–95 %).

Удельный вес природного газа в электроэнергетической отрасли достиг 95–96 %. Доля газа в топливно-энергетическом балансе страны составляет более 60 %. В Республике Беларусь доля импортируемых энергоресурсов составляет 85 %. При этом имеются сложности с созданием достаточно больших запасов газа. Имеющиеся подземные газовые хранилища не соответствуют требованиям порогового резервирования данного вида топлива (25 % годового объема потребления).

Следует учитывать и ограниченность запасов природного газа в недрах Земли. Ряд индустриально развитых стран вообще не имеют или имеют мало собственных месторождений природного газа.

Мазут в число топлив с малым содержанием углерода включать нельзя, поскольку в нем содержится лишь 11 % водорода, а массовая концентрация углерода около 83 %.

Библиотека ГГТУ им. П.О.Сухого

На основании этого сжигание ископаемых топлив с малым содержанием CO_2 нельзя рассматривать в качестве перспективного направления уменьшения выбросов CO_2 в атмосферу.

Энергетика, построенная на углеводородах, исторически себя исчерпала. Запасы ископаемого топлива сокращаются, а продолжение его использования в качестве энергоисточника ухудшает экологическую ситуацию. Все большее число экологов приходят к выводу, что использование ядерной энергии – лучший способ снижения эмиссии углерода в атмосферу.

В настоящее время ядерная энергетика имеет реальный резерв топлива и минимально загрязняет окружающую среду.

Необходимость развития ядерной энергетики и строительства атомной электростанции в Республике Беларусь вызвана следующими обстоятельствами:

1. Повышение уровня энергетической безопасности республики.
2. Диверсификация поставщиков и видов топлива в топливно-энергетическом балансе страны.
3. Снижение уровня использования природного газа в качестве энергоресурса.
4. Снижение затрат на импортируемые энергоносители.
5. Возможность создания гарантированного запаса топлива для энергогенерирующей установки на длительное время. Возможность диверсификации поставщиков ядерного топлива.
6. Снижение выбросов парниковых газов в атмосферу.

Технико-экономические расчеты, выполненные в НАН Беларуси, подтвердили целесообразность развития в республике атомной энергетики. Рассмотрение различных сценариев покрытия прогнозируемого дефицита электрических мощностей показывает, что введение в энергосистему источника на ядерном топливе приводит к снижению стоимости производимой энергосистемой электроэнергии.

6.4. Энергосбережение

Энергосбережение дает важный вклад в снижение выбросов CO_2 в атмосферу. Критерием оценки возможной экономии энергии служит удельная энергоемкость мирового валового продукта (МВП). Речь, конечно, не идет о том, что энергоемкость МВП должна непрерывно уменьшаться во всех секторах народного хозяйства и при всех обстоятельствах. Например, в странах, где электрификация находится в ранней стадии развития, для обеспечения необходимого экономического развития темпы роста потребности в электроэнергии будут,

Библиотека ГГТУ им. П.О. Сухого

очевидно, опережать темпы увеличения производства национального валового продукта (НВП). Но в основном мероприятия по экономии энергии направлены на снижение удельной энергоемкости МВП.

На основании прогнозов потенциальные возможности экономии энергии, выраженные показателями относительной удельной энергоемкостиемкости МВП, в 2020 г. могут составить 48 %.

Энергосбережение должно осуществляться путем уменьшения потери энергии на всех стадиях ее преобразования – от первичных источников до конечного использования на основе достижений научно-технического прогресса, создания энергосберегающего оборудования и приборов, замены устаревшего оборудования на электростанциях и в электросетях на высокоэкономичное и экологически приемлемое, а также более квалифицированная эксплуатация энергообъектов, повышение качества их проектирования и строительства и т. д.

Существует еще один путь осуществления энергосбережения – перестройка энергобаланса за счет развития нетрадиционных возобновляемых источников энергии (ВИЭ) – ветра, солнца, энергии рек, приливов, тепла земли, биомасс и др.

6.5. Использование возобновляемых источников энергии

Необходимое условие научно-технического и социального прогресса состоит в увеличении количества потребляемой энергии и освоении новых более эффективных ее видов.

Использование возобновляемых источников энергии на Земле может стать кардинальным решением проблемы взаимодействия энергетики с окружающей средой.

Гидроэнергетика

На первое место здесь следует поставить *гидроэнергетику*, которую можно отнести к числу традиционных возобновляемых источников энергии. Гидроэнергия широко применяется во всем мире. Как правило, освоение гидроэнергии основных рек идет по пути строительства каскадов электростанций, что способствует более полному и эффективному использованию водных ресурсов.

В 50–60-х гг. XX в. в Беларуси работало около 200 малых ГЭС, которые затем в основном были списаны. Но сейчас постоянный рост цен на органическое топливо приводит к значительному удорожанию электрической энергии, и малая гидроэнергетика обретает новую

Библиотека ГГТУ им. П.О. Сухого

жизнь. В Беларуси, начиная с 1991 г., восстановлено, капитально отремонтировано и построено около 20 малых ГЭС.

ГЭС также отрицательно воздействует на окружающую среду. Плотины малых ГЭС Беларуси сооружаются в равнинных местностях, при этом значительные площади земли занимают мелководные водохранилища.

Энергия ветра

Кинетическая энергия атмосферы является наиболее доступной, но и наименее стабильной и концентрированной энергией. В настоящее время она находит применение в «малой» энергетике.

Современные ВЭС пока не конкурентоспособны с традиционными источниками ЭЭ. Удельные капиталовложения 800–1200 дол./кВт.

Основным направлением использования ВЭУ на ближайшую перспективу до 2005 г. будет их применение для привода насосных установок небольшой мощности (5–8 кВт) и подогрева воды в сельскохозяйственном производстве. Эти области применения характеризуются минимальными требованиями к качеству электрической энергии, что позволяет резко упростить и удешевить ВЭУ.

Солнечная энергия

По метеорологическим данным в Беларуси в среднем 250 дней пасмурных, 185 – с переменной облачностью и 30 – ясных, а среднегодовое поступление солнечной энергии на земную поверхность с учетом ночей и облачности составляет 243 каллорий на 1 см^2 в сутки, что эквивалентно 2,8 кВт · ч, а с учетом КПД преобразования 12 % – 0,3 кВт · ч/сут.

С учетом опыта создания солнечной электростанции в Крыму, а также зарубежного опыта удельные капвложения и себестоимость получаемой электроэнергии многократно превышают ее производство на других источниках. Технический прогресс в этой области, естественно, будет способствовать снижению затрат, однако для условий Беларуси в прогнозируемом периоде составляющая производства электроэнергии с помощью солнечной энергии будет практически не ощутима.

Основными направлениями использования солнечной энергии будут гелиоустановки для интенсификации процессов сушки и подогрева воды в сельскохозяйственном производстве и других бытовых целей.

Библиотека ГГТУ им. П.О. Сухого

6.6. Теплофикация

Экологическая эффективность теплофикации связана с экономией топлива при комбинированной на ТЭЦ, раздельной на КЭС и районной котельной выработке тепловой и электрической энергии.

Имеющийся опыт использования технологии по комбинированному производству электрической и тепловой энергии показывает, что теплофикация дает возможность обеспечить существенное (до 30 % в сравнении с раздельной схемой энергоснабжения) уменьшение потребности страны в органическом топливе и соответствующее уменьшение выбросов парниковых газов. Страны Европейского союза планируют увеличить, по сравнению с 1995 г., долю производства электроэнергии на ТЭЦ к 2010 г. с 9 до 18 %. Даже в такой стране, как США, где климатические условия не требуют больших объемов тепловой энергии для обеспечения нормальной жизнедеятельности страны, компания «Trigen Energy Corp.» (США) собирается удвоить эффективность ТЭС в Филадельфии, Чикаго и Тулсе путем простого превращения «сбросной» теплоты в пар для обогрева офисных зданий и использования его в производственных процессах промышленных предприятий.

6.7. Реализация технических решений, повышающих коэффициент полезного действия тепловых электрических станций как путь снижения выбросов CO_2

Реализация технических решений, повышающих КПД ТЭС как путь снижения выбросов CO_2 в атмосферу представляется в настоящее время наиболее реальным.

Проблема снижения выброса в атмосферу парниковых газов (CO_2) энергетикой связана с необходимостью замены существующих на ТЭС агрегатов, выработавших свой ресурс и морально устаревших, новым оборудованием и установками, использующими высокоэффективные технологии.

Современная *парогазовая технология* это одна из самых экологичных современных энерготехнологий. Она позволяет потреблять меньше топлива, а следовательно, и снизить объемы вредных выбросов в атмосферу, а также сбросы в воды реки.

Применение *тепловых насосов* экологически приемлемое решение проблемы теплоснабжения. Тепловые насосы – это компактные экономичные и экологически чистые системы отопления, позволяющие получать тепло для горячего водоснабжения и отопления за счет тепла от низкопотенциальных источников (грунтовые и артезианские воды, озера, моря, грунтовое тепло, тепло земных недр).

Библиотека ГГТУ им. П.О.Сухого

Тема 7. РАССЕИВАНИЕ В АТМОСФЕРЕ ВЫБРОСОВ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ. МОНИТОРИНГ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ

7.1. Дымовые трубы

7.2. Контроль состава и концентрации вредных веществ в уходящих газах котлов

7.3. Автоматизированная система мониторинга выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух

7.1. Дымовые трубы

С развитием энергетики дымовые трубы стали использоваться для рассеивания содержащихся в дымовых газах вредных примесей в атмосферном воздухе до допустимых концентраций. По мере повышения мощности электростанций и ухудшения качества топлива для обеспечения необходимого рассеивания потребовались трубы большой высоты 200, 300 м и более. Прогрессивным решением в отношении строительства высоких дымовых труб явилось применение монолитных железобетонных стволов, выдерживающих ветровые и весовые нагрузки. Железобетон, являясь прочным материалом, оказался не способным противостоять воздействию сернистых соединений, влаги и повышенной температуры дымовых газов. Поэтому возникла необходимость создания второй внутренней оболочки, имеющей назначение ограждающей поверхности для агрессивных дымовых газов.

Внутренняя поверхность железобетонного ствола трубы покрыта изоляцией – эпоксидным лаком и стеклотканью. Футеровка выполнена из красного и кислотоупорного кирпича, прямого или лекального, на диабазовой или андезитовой замазке и опирается на железобетонные консоли несущего ствола, выполняемые через 30–50 м (рис. 7.1).

Для защиты железобетонного ствола трубы на верхнем ее обрезе устанавливается чугунный колпак (рис. 7.1, *б*). Для установки на трубе светоградительных огней предусматриваются светофорные площадки, располагаемые по высоте трубы через каждые 15 или 30 м. Трубу окрашивают полосами красного цвета шириной 2–2,5 м с интервалами по высоте 15 м. Для обслуживания площадок делается лестница с ограждением; предусматривается система грозозащиты.

Библиотека ГГТУ им. П.О. Сухого

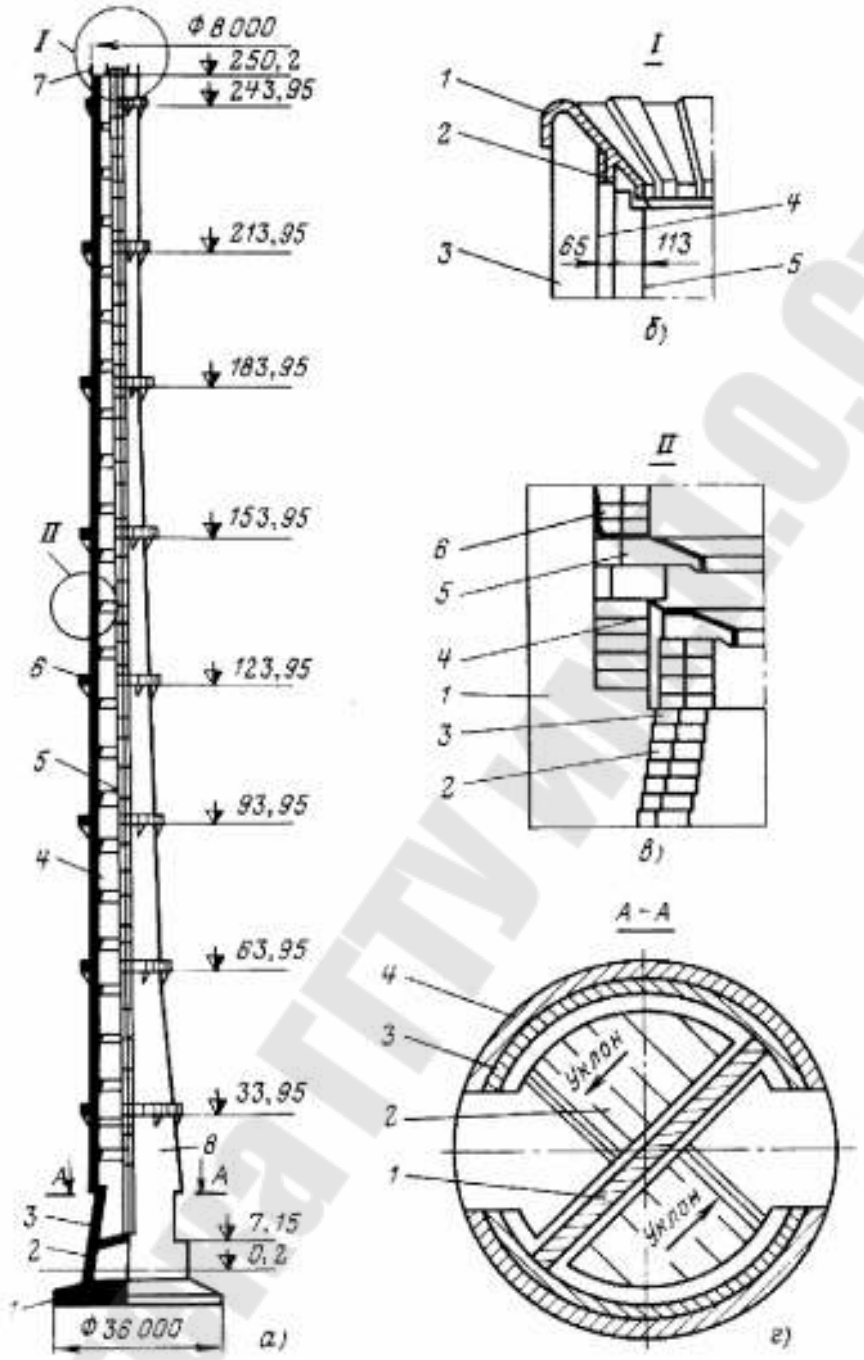


Рис. 7.1. Железобетонная футерованная труба: *а* – общий вид: *1* – фундамент; *2* – цоколь; *3* – пандус; *4* – ствол; *5* – ходовая лестница; *6* – светофорная площадка; *7* – грозозащита; *б* – верхняя часть: *1* – чугунный колпак; *2* – асбестовая прокладка; *3* – ствол; *4* – изоляция; *5* – футеровка; *в* – средняя часть: *1* – железобетонный ствол; *2* – кислотоупорный кирпич; *3* – красный кирпич; *4* – асбестовый шнур; *5* – слезниковый кирпич; *6* – антикоррозионная защита; *г* – нижняя часть: *1* – перегородка; *2* – пандус; *3* – футеровка; *4* – ствол

Библиотека ГГТУ им. П.О. Сухого

В течение всего срока эксплуатации электростанции (30–50 лет) труба должна работать без ремонта. Однако в результате движения агрессивных газов через неплотности футеровки, конденсации паров и проникновения жидкости через бетонный ствол наружу происходит разрушение трубы.

Основной причиной попадания дымовых газов в толщу ствола дымовой трубы являются избыточные статические давления дымовых газов в газоотводящем стволе по отношению к атмосфере. Эффективным средством борьбы с избыточными статическими давлениями является установка небольших диффузоров в верхней части трубы.

Для повышения надежности дымовых труб наряду с ликвидацией избыточных статических давлений применяется разделение функций газоотводящего и несущего ствола.

С этой целью между ограждающими и несущими стволами выполняется воздушный зазор 150–200 мм. В этом зазоре обеспечена циркуляция воздуха для вывода просачивающихся через футеровку агрессивных газов. Воздух засасывается из атмосферы и подогревается в калорифере паром из отбора турбины до температуры 50–90 °С. Вентилятор установлен под газоотводящим каналом трубы и направляет воздух в воздушный канал (прослойку) трубы.

7.2. Контроль состава и концентрации вредных веществ в уходящих газах котлов

Создание надежных и точных методов и средств контроля вредных выбросов ТЭС и их концентраций в уходящих газах и в атмосфере является сложной задачей.

В настоящее время выбросы тепловых электростанций контролируются по четырем вредным ингредиентам (SO_2, NO_x, CO и пыль).

Методы и средства анализа уходящих газов (и атмосферы) развиваются в двух направлениях: промышленном и лабораторном. Методы лабораторного анализа можно разделить на три группы: химические, инструментальные и биологические.

Для промышленного анализа дымовых газов наибольшее распространение получили физико-химические методы.

Электрические методы. Большим достоинством электрических методов является высокая чувствительность и стабильность. В промышленной санитарии наиболее успешно используются кондуктометрический и кулонометрический методы. Принцип *кондуктометрического* анализа заключается в измерении изменения электрическо-

Библиотека ГГТУ им. П.О.Сухого

го сопротивления раствора при поглощении компонента газовой смеси. Кондуктометрический метод имеет высокую чувствительность (0,05 мг/м^3 и ниже), отличается простотой и надежностью инструментальных средств, универсален, обладает возможностью анализа на различные ингредиенты, например, SO_2, NO_x, CO, SO_3 и др.

Кулонометрический метод анализа газов основан на измерении токов электродной реакции, в которую вступает определяемое вещество, являющееся деполяризатором и непрерывно подаваемое в кулонометрическую ячейку с потоком анализируемого газа. Достоинства этого метода: высокая чувствительность, компактность конструкции, эксплуатационная надежность. Кулонометрические газоанализаторы нашли широкое применение для анализа атмосферного воздуха.

Оптические методы. Из оптических методов наибольшее распространение для определения концентраций вредных выбросов ТЭС как в уходящих газах, так и в атмосфере получили фотокалориметрический, спектрофотометрический, люминесцентный и лазерный методы.

Для определения концентрации диоксида серы применяется *фотокалориметрический метод*, основанный на просасывании воздуха, содержащего SO_2, через поглотительный раствор тетрахлормеркурата натрия (ТХМ). Образовавшийся дихлорсульфатомеркурант натрия с кислым раствором *п*-розанилина и формальдегидом дает комплекс фиолетово-красного цвета, интенсивность окраски которого пропорциональна концентрации сернистого газа.

В *спектрофотометрических методах* используют принцип поглощения ультрафиолетовых или инфракрасных излучений. При этом достигается высокая чувствительность и простота прибора.

Люминесцентный метод основывается на способности атомов и молекул поглощать энергию, поступающую к ним извне, что вызывает новое энергетическое состояние вещества, называемое возбужденным. Возбужденные атомы способны отдавать избыточную энергию или часть ее в виде света. Люминесцентный анализ один из самых высокочувствительных и быстрых физико-химических методов измерения концентрации органических и неорганических веществ. На базе этого метода созданы лабораторные и промышленные приборы, в том числе и по измерению концентраций вредных выбросов ТЭС.

В настоящее время широко внедряется на ТЭС хроматографический метод газового анализа, который также относится к физическим методам газового анализа. Этот метод заключается в разделении газовой смеси при пропускании ее совместно с потоком вспомогательного

Библиотека ГГТУ им. П.О.Сухого

газа (газа-носителя) через слой пористого вещества (адсорбента) и последующим поочередным измерением содержания каждого выделившегося компонента электрическим методом.

Хроматографические газоанализаторы служат для определения содержания в дымовых газах горючих (CO, CH_4, H_2 и др.), характеризующих химическую неполноту сгорания, и негорючих (CO_2, O_2, N_2 и др.) компонентов.

Для определения содержания пыли в газовых выбросах ТЭС применяют *фотометрический* и *оптический сорбционный методы*. *Фотометрический метод* измерения основан на свойстве частиц пыли осаждаться на движущемся фильтре и непрерывном определении оптической плотности этого пылевого осадка. Оптическую плотность пылевого осадка в существующих приборах определяют измерением поглощения им света.

Оптический метод основан на явлении поглощения света при прохождении его через пылегазовую среду. Пылемеры, построенные на этом принципе, практически безынерционны, не требуют пробоотборного устройства и позволяют определять мгновенные значения концентрации пыли без внесения возмущений в исследуемую среду. Недостатками метода являются влияние изменений химического и дисперсного составов пыли на результаты измерений и сравнительно узкий интервал измеряемых концентраций.

Оптические пылемеры должны иметь надежные средства защиты от пыли оптических деталей. Наиболее распространенным средством такой защиты является обдув поверхности защитных окон чистым воздухом.

При создании оптических пылемеров используют как однолучевые, так и двухлучевые оптические системы. Однолучевые оптические пылемеры имеют более простые оптические и электрические схемы, но дают большие погрешности измерения.

При современных темпах развития общества давно назрела проблема качественного и оперативного контроля за состоянием окружающей среды, а также принятия решений, основанных на достоверной информации.

Компьютеризация воздушно-охранной деятельности является одним из важнейших направлений развития системы управления качеством атмосферного воздуха.

Непрерывный мониторинг выбросов загрязняющих веществ в атмосферу является обязательным условием соблюдения основных

Библиотека ГГТУ им. П.О.Сухого

экологических требований во всем мире при промышленном производстве.

Ограниченность применения имеющихся технологий контроля обусловила необходимость разработки и внедрения как более совершенных традиционных методов, так и инновационных подходов для обеспечения непрерывности мониторинга выбросов загрязняющих веществ. В последнее время ощущается недостаток достоверной информации по устойчивости, надежности, применимости, точности, экономической эффективности и сопоставимости рабочих характеристик по ряду уже разработанных и широко применяемых методов.

В настоящее время на многих предприятиях внедряются *автоматизированные системы контроля загрязнения атмосферы* (АСК ЗВ), представляющие собой сеть контрольно-измерительных станций (КЗС), оснащенных датчиками и электронной аппаратурой, каналов связи и информационного центра, где производятся сбор и обработка данных об уровне загрязнения воздуха контролируемого района.

7.3. Автоматизированная система мониторинга выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух

В решении проблемы снижения загрязняющих выбросов от энергетических предприятий играет важную роль инструментальный автоматический контроль этих загрязнений.

Необходимо точное измерение количества загрязняющих веществ, выбрасываемых промышленными предприятиями. В настоящее время количество выбросов загрязняющих веществ определяется расчетным способом по косвенным показателям, а именно – по количеству сжигаемого топлива и экспертным замерам содержания загрязняющих веществ в дымовых газах. Однако первые же замеры выбросов загрязняющих веществ показали явное несоответствие между расчетным и измеренным количеством выбросов. Эту проблему можно решить при помощи автоматизированной системы мониторинга (АСМ).

Автоматизированная система мониторинга выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух: комплекс средств измерений и электронных устройств, связанных в единый комплекс и обеспечиваю-

Библиотека ГГТУ им. П.О.Сухого

щих автоматическое измерение концентраций загрязняющих веществ в отходящих газах, их выбросов и других параметров отходящих газов.

Сегодня, при существующих тарифах платы за выбросы загрязняющих веществ в атмосферу, АСМ позволит экономить немалые деньги.

АСМ служит для:

– контроля за соблюдением нормативов выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух, г/с, т/год;

– учета выбросов загрязняющих веществ, отчетности и исчисления экологических платежей (налога на выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух);

– использования результатов измерений в национальной системе мониторинга окружающей среды;

– планирования и оценки эффективности мероприятий по снижению выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух.

Состав (структура) АСМ

АСМ состоит из следующих основных узлов:

– стационарных газоанализаторов;

– стационарных измерителей скорости отходящих газов или расхода топлива;

– блоков сбора, обработки, хранения и передачи информации;

– вспомогательных узлов.

Блок сбора, обработки, хранения и передачи информации представляет собой электронное устройство (контроллер, вычислитель, компьютер), который и должен обеспечивать: опрос измерительных приборов, входящих в систему (газоанализатор, измеритель расхода отходящих газов и т. д.); производить необходимые вычисления, архивировать информацию, выдавать результаты расчетов на верхний уровень – в компьютер, сеть Ethernet, АСУ, а также через модем в удаленные информационные системы и сети (при необходимости).

Компьютер со специальной программой должен обеспечивать получение информации от блока сбора и обработки данных, производить дополнительные расчеты, строить графики, таблицы, формировать сообщения (например, о превышении ПДВ, выходе из строя какого-либо узла и т. д.), выводить ее на принтер и передавать в местную или удаленную информационную сеть.

Библиотека ГГТУ им. П.О. Сухого

Состав и использование информации, полученной при мониторинге

В состав информации, выдаваемой АСМ в режиме реального времени, входит:

– концентрация кислорода, %;

– концентрация диоксида углерода, %;

– концентрации ЗВ (загрязняющих веществ) в размерности ppm и мг/нм^3;

– выбросы ЗВ в единицу времени г/с, осредненные за 20 минут;

– расход дымовых газов, нм^3/ч;

– величины, накопленные за определенный промежуток времени: выбросы ЗВ и CO_2 за сутки (по желанию заказчика за 1 час, 1 смену), за месяц, т/мес, за год, т/год. Информация о средних за 20 минут выбросах в граммах в секунду и концентрациях загрязняющих веществ, а также за месяц и год по источникам выбросов используется для учета выбросов и отчетности.

В АСМ предусматривается *автоматическое сравнение* следующих параметров: выбросов в г/с, усредненных за 20 минут, с контрольным нормативом ПДВ в г/с; по желанию максимально измеренные концентрации ЗВ, осредненные за 20 минут, с нормой выброса в мг/нм^3.

При этом может фиксироваться количество превышений в течение каждого месяца.

В случае превышения норматива включается сообщение «тревога» на дисплее компьютера (допускается сопровождение звуковым сигналом).

Результаты мониторинга показываются в виде таблицы на дисплее, отображающей текущие значения и таблиц, отображающих накопленные значения выбросов и платежей за заданные интервалы времени.

АСМ автоматически рассчитывает платежи за выбросы по каждому измеряемому веществу и в сумме на основании величин выбросов, определенных за месяц, и утвержденных ставок платежей. Расчеты платежей за год выполняются автоматически на основании данных за каждый месяц. Эта информация используется для производства платежей за выбросы.

Результаты мониторинга транслируются в режиме реального времени в экологическое подразделение предприятия и при необходимости – руководству и в другие службы по заводской сети, либо

Библиотека ГГТУ им. П.О. Сухого

иным образом. Эти результаты в обязательном порядке передаются руководству цеха, в котором находится данный источник выброса для постоянного анализа работы оборудования, подключенного к источнику в течение каждых суток. При превышении нормативов цех принимает необходимые меры, используя получаемую информацию для оперативного анализа и управления.

Технологические схемы размещения аналитического оборудования и подключения его к технологическому оборудованию

Места размещения газоанализаторов, измерителей расхода газов и другого оборудования определяются в зависимости от типа аналитического, технологического оборудования, выбросы которого подвергаются мониторингу, его компоновки и конструктивных особенностей, технологических параметров, а также тех задач, которые ставит пользователь при выборе схемы мониторинга.

Примеры вариантов возможных схем включения даны на рис. 7.2, 7.3.

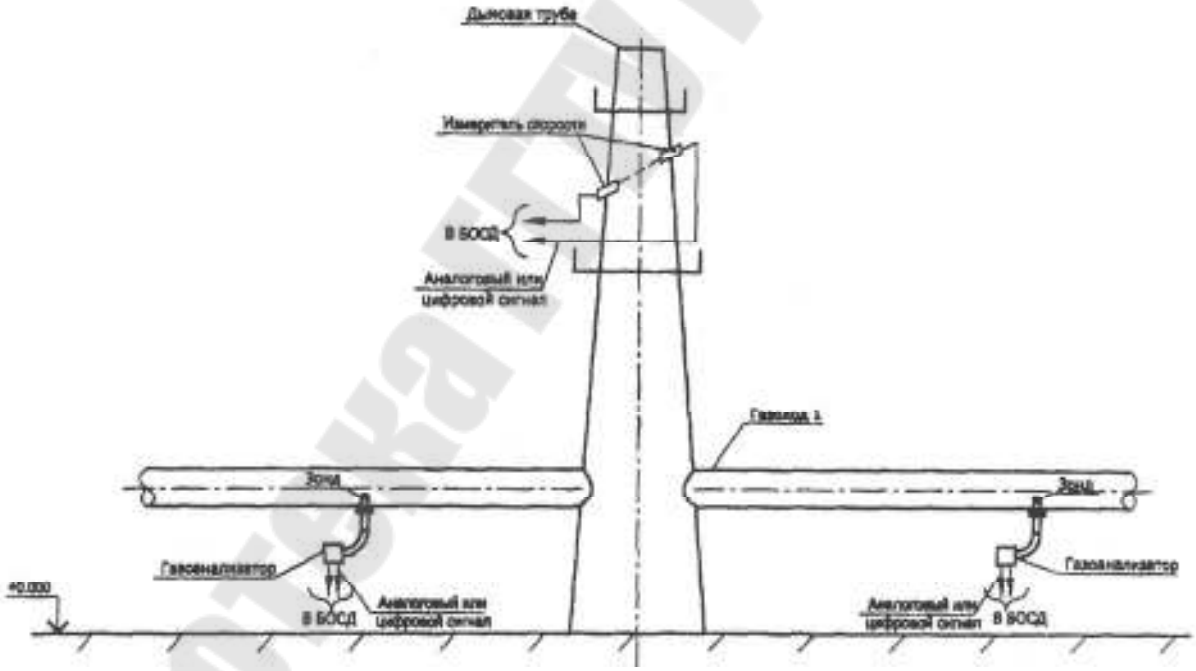


Рис. 7.2. Размещение аналитического оборудования для непрерывного мониторинга на газоходах

Библиотека ГГТУ им. П.О.Сухого

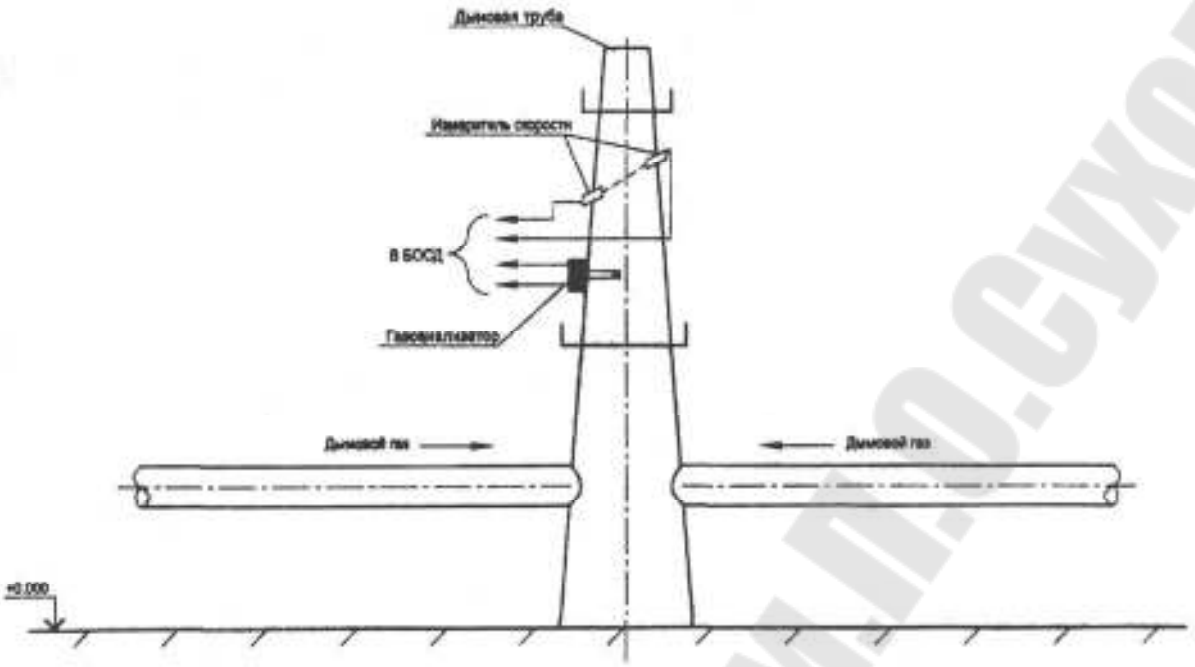


Рис. 7.3. Размещение аналитического оборудования автоматизированной системы мониторинга на дымовой трубе

Применяются схемы установки газоаналитического оборудования на источники выделения и источники выброса. В первом случае выбросы на источнике выбросов определяются как сумма выбросов на источниках выделения.

Преимуществами первой схемы является возможность получения информации о концентрациях загрязняющих веществ после технологической установки, о выбросах конкретного оборудования и об эффективности технологического процесса.

Преимуществом второй схемы является меньшие затраты на проведение мониторинга, осуществляемого для группы оборудования, подключенного к источнику выбросов.

Библиотека ГГТУ им. П.О. Сухого

Тема 8. СТОЧНЫЕ ВОДЫ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ И ИХ ОЧИСТКА

8.1. Классификация сточных вод тепловых электрических станций

8.2. Влияние сточных вод тепловых электрических станций на природные водоемы

8.3. Основные направления сокращения водопотребления и сброса сточных вод

8.4. Очистка и утилизация сточных вод, загрязненных нефтепродуктами

8.5. Обезвреживание и повторное использование обмывочных вод регенеративных воздухонагревателей и конвективных поверхностей нагрева котлов

8.6. Сокращение количества и обезвреживание сточных вод химических промывок и консервация оборудования

8.7. Очистка и утилизация грунтовых, ливневых и талых сточных вод с территории тепловых электрических станций

8.1. Классификация сточных вод тепловых электрических станций

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

Вода, используемая на ТЭС, разделяется по ряду характерных признаков. Приняты следующие основные термины и определения по водопотреблению и водоотведению.

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

Свежая (*добавочная*) *вода* – это вода, поступающая в технологические системы ТЭС из водных объектов совместного пользования (природного источника, каналов, городского водопровода и др.) или очищенная сточная вода, подаваемая для восполнения безвозвратных потерь воды и потерь на продувку.

Безвозвратные потери воды – это потери воды при производстве тепловой и электрической энергии в результате естественного и

Библиотека ГГТУ им. П.О. Сухого

дополнительного испарения, уноса капельной влаги, утечек пара в паровом цикле и др.

Оборотная вода – это вода, использованная в технологическом цикле электростанции и после охлаждения или очистки, идущая на те же цели.

Повторно используемая вода – это вода, используемая в нескольких технологических системах электростанции после ее охлаждения или очистки, например, очищенные нефтесодержащие стоки, применяемые для подпитки оборотных систем.

Последовательно используемая вода – это вода, используемая поочередно в нескольких производственных процессах или агрегатах без промежуточного охлаждения или очистки, например охлаждающая вода, которая подается после конденсаторов турбин в систему гидрозолоудаления или водоподготовки.

Продувочная вода – это вода, отбираемая из системы оборотного водоснабжения и заменяемая добавочной для поддержания солевого состава оборотной воды и загрязненности органическими веществами на определенном уровне.

Водопотребление – это потребление свежей (добавочной) воды из водного объекта или системы водоснабжения.

Полное водопотребление – это сумма объемов свежей и оборотной воды.

Водоотведение – это отведение вод, использованных электростанцией.

Воды, отводимые после хозяйственно-бытовой и производственной деятельности электростанции, загрязненные и нагретые, называются *сточными*. Сточные воды могут сбрасываться в водоемы (водоисточники), подземные горизонты и бессточные скважины, частично или в полном объеме передаваться другим предприятиям.

Нормативно чистые сточные воды – это сточные воды, допустимые к сбросу без очистки, отведение которых в водные объекты не приводит к нарушению качества воды в контролируемом створе или пункте водопользования.

Нормативно очищенные сточные воды – это сточные воды, отведение которых после очистки в водные объекты не приводит к нарушению норм качества воды в контролируемом створе или пункте водопользования.

Библиотека ГГТУ им. П.О. Сухого

Загрязненные сточные воды – это воды, сброс которых вызывает нарушение норм качества воды в контролируемом створе или пункте водопользования.

Нормы качества воды – установленные значения показателей качества воды по видам водопользования.

Правила охраны вод – установленные требования, регламентирующие деятельность человека в целях соблюдения норм охраны вод.

Предельно допустимая концентрация (ПДК) – концентрация веществ в воде, превышение которой делает ее непригодной для одного или нескольких видов водопользования.

Предельно допустимый сброс веществ в водный объем (ПДС) – масса веществ в сточных водах, максимально допустимая к отведению с установленным режимом в данном пункте водного объекта в единицу времени с целью обеспечить нормы качества воды в контролируемом створе или пункте водопользования.

Предельно допустимый сброс веществ устанавливается с учетом ПДК веществ в местах водопользования, ассимилирующей способности водного объекта и оптимального распределения массы сбрасываемых веществ между водопользователями, сбрасывающими сточные воды.

Тепловое загрязнение – поступление теплоты в водный объект, вызывающее нарушение норм качества воды.

Удельный сброс загрязняющих веществ – количество загрязняющих веществ, сбрасываемых в водоем при производстве единицы продукции (для ТЭС – это отпуск электрической и тепловой энергии).

Потребность в водных ресурсах (водопотребление полное) на ТЭС выражается в виде суммы потребностей в свежей, оборотной и повторно или последовательно используемой воде.

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

Составы перечисленных стоков различны и определяются типом ТЭС и основного оборудования, ее мощностью, видом топлива, со-

Библиотека ГГТУ им. П.О.Сухого

ставом исходной воды, способом водоподготовки в основном производстве и, конечно, уровнем эксплуатации.

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

Масла могут попадать в сточные воды также из главного корпуса, гаражей, открытых распредустройств, маслохозяйств.

Количество вод систем охлаждения определяется в основном количеством отработавшего пара, поступающего в конденсаторы турбин. Следовательно, больше всего этих вод на конденсационных ТЭС (КЭС) и АЭС, где количество воды (т/ч), охлаждающей конденсаторы турбин, может быть найдено по формуле

$$Q = KW,$$

где W – мощность станции, МВт; K – коэффициент (для ТЭС $K = 100–150$, для АЭС $K = 150–200$).

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

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

Стоки после химической промывки или консервации теплосилового оборудования весьма разнообразны по своему составу вследствие обилия промывочных растворов. Для промывок применяются соля-

Библиотека ГГТУ им. П.О.Сухого

ная, серная, плавиковая, сульфаминовая минеральные кислоты, а также органические кислоты: лимонная, ортофталевая, адипиновая, щавелевая, муравьиная, уксусная и др. Наряду с ними используются трилон Б, различные ингибиторы коррозии, поверхностно-активные вещества, нитриты, аммиак.

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

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

При эксплуатации водоподготовки обессоленной воды на ТЭС и АЭС возникают *стоки от склада реагентов*, *промывок механических фильтров*, *удаления шламовых вод осветлителей*, *регенерации ионитовых фильтров*. Эти воды несут значительное количество солей кальция, магния, натрия, алюминия, железа. Например, на ТЭЦ, имеющей производительность химводоочистки 2000 т/ч, сбрасывается солей до 2,5 т/ч.

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

В современных условиях создание малоотходных ТЭС – технически разрешимая задача.

8.2. Влияние сточных вод тепловых электрических станций на природные водоемы

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

Библиотека ГГТУ им. П.О.Сухого

жет быть нарушено в результате человеческой деятельности, в частности сброса сточных вод ТЭС.

Так как сбросы воды из систем охлаждения оборудования ТЭС несут в основном «тепловое» загрязнение, следует иметь в виду, что температура оказывает мощное воздействие на биоценоз в водоеме. С одной стороны, температура оказывает прямое влияние на скорость протекания химических реакций, с другой – на скорость восстановления дефицита кислорода. При повышении температуры ускоряются процессы размножения гидробионтов.

Воздействие подогретых вод ТЭС на водные объекты совместного пользования неоднозначно. Оно может иметь как положительные, так и отрицательные последствия, хотя в научной литературе в основном подчеркиваются негативные экологические последствия подогрева.

Резкий перепад температур, который возникает при сбросе в водоем нагретых вод, приводит к гибели рыбы и представляет серьезную угрозу рыбному хозяйству. Влияние сточных вод, температура которых на 6–9 °С выше температуры речной воды, губительно даже для рыб, адаптированных к летней температуре до +25 °С.

Среднемесячная температура воды в расчетном створе водоема хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования летом после сброса нагретой воды не должна повышаться более чем на 3 °С по сравнению с естественной среднемесячной температурой воды на поверхности водоема или водотока для наиболее жаркого месяца года. Среднемесячная температура воды наиболее жаркого месяца в расчетном створе рыбохозяйственных водоемов не должна превышать 28 °С, а для водоемов с холодноводными рыбами (лососевыми и сиговыми) не должна превышать 20 °С.

Снижение отрицательного влияния ТЭС на водоемы осуществляется следующими основными путями:

– очисткой сточных вод перед их сбросом в водоемы, организацией необходимого контроля;

– уменьшением количества сточных вод вплоть до создания бесточных электростанций;

– использованием сточных вод в цикле ТЭС; усовершенствованием технологии самой ТЭС.

Библиотека ГГТУ им. П.О. Сухого

8.3. Основные направления сокращения водопотребления и сброса сточных вод

В настоящее время потребители воды, в том числе и ТЭС, платят за забор свежей воды, сброс сточных вод и содержащиеся в них загрязняющие вещества, а также за размещение отходов и другие виды вредного воздействия на окружающую природную среду. Это стимулирует как снижение водопотребления, так и уменьшение количества сточных вод и содержащихся в них примесей, выделение осадков в виде сырья или товарных продуктов.

Радикальным способом сокращения водопотребления и охраны водных объектов от загрязнения становится уменьшение потерь воды и повторное использование сточных вод в технологических циклах ТЭС. Опыт показывает, что при повторном использовании сточных вод в большинстве случаев требуется меньшая глубина очистки, а следовательно, и меньшие затраты, чем при сбросе сточных вод в водные объекты.

Для сокращения водопотребления и сброса сточных вод наиболее перспективны следующие направления:

– максимальное применение систем оборотного водопользования;

– повторно-последовательное использование воды в нескольких технологических циклах;

– применение методов обработки воды, в результате которых сточные воды не образуются вообще, либо могут быть использованы в других циклах непосредственно или после соответствующей обработки;

– выделение и использование ценных веществ, содержащихся в производственных сточных водах.

Наибольшее распространение на современных ТЭС нашли системы оборотного охлаждения оборудования и в меньшей степени используются три других направления.

Схемы и технологии очистки сточных вод и способы их использования выбираются в зависимости от конкретных условий проектируемой или реконструируемой ТЭС, в том числе от типа основного оборудования, режима его работы, вида топлива, способа золошлакоудаления, системы охлаждения оборудования, схемы водоподготовительных установок, местных климатических условий и других факторов.

Система водоснабжения ТЭС должна обеспечивать максимальное повторное использование сточных вод взамен природной воды.

Библиотека ГГТУ им. П.О. Сухого

В связи с этим смешение сточных вод различного качества до их очистки не допускается. Сточные воды различного качества до локальных очистных сооружений следует отводить по самостоятельным канализационным системам.

В настоящее время большинство отечественных ТЭС имеют СОО с прудами-охладителями или градирнями, на остальных ТЭС используют прямоточные системы охлаждения.

Пути сокращения потребления исходной воды и количества сбросов в водоемы сточных вод этой категории водопользования следующие:

– максимальное использование СОО;

– применение градирен с каплеуловителями;

– совершенствование методов коррекционной обработки охлаждающей воды с целью максимально сократить количество сточных вод;

– использование продувочной воды СОО для других нужд;

– подача в СОО сточных вод других водопотребителей, по солевому составу близких к составу оборотной воды СОО.

Основное требование к охлаждающей воде – минимальное образование в системе охлаждения отложений минерального и биологического характера. Для этого используют следующие виды обработки воды в СОО:

– изменение концентрации растворенных в воде примесей, участвующих в процессах образования отложений или коррозии металла: подкисление, рекарбонизация (дымовыми газами), известкование (с последующим подкислением), частичное Н-катионирование;

– дозирование ингибиторов накипеобразования и коррозии – гексаметафосфата натрия, тринатрийфосфата и др. В последнее время широко применяют реагенты марок ОЭДФК, ИОМС и другие специальные реагенты. Для защиты от биологических обрастаний используют обработку хлором, медным купоросом и др.;

– физические или физико-химические методы: магнитная обработка воды, обработка ультрафиолетовыми лучами, слабым электрическим током и др.

Продувочную воду целесообразно применять для приготовления добавочной воды котлов и подпиточной воды теплосети.

Библиотека ГГТУ им. П.О. Сухого

8.4. Очистка и утилизация сточных вод, загрязненных нефтепродуктами

Технически проблема очистки этого вида сточных вод на ТЭС решена. Существуют типовые очистные сооружения.

Нашла применение многоступенчатая обработка (рис. 8.1). Сточные воды, загрязненные нефтепродуктами, собираются в распределительной камере *1*, откуда подаются в резервуары-отстойники *2*, которые имеют конические днища и устройства для сбора и отвода всплывших и осевших нефтепродуктов. Для улучшения процесса отстаивания сточные воды целесообразно подогревать до 40 °С. Вместимость резервуаров *2* рассчитана на прием четырехчасового поступления сточных вод. Остаточное содержание нефтепродуктов после них составляет 35–40 мг/кг.

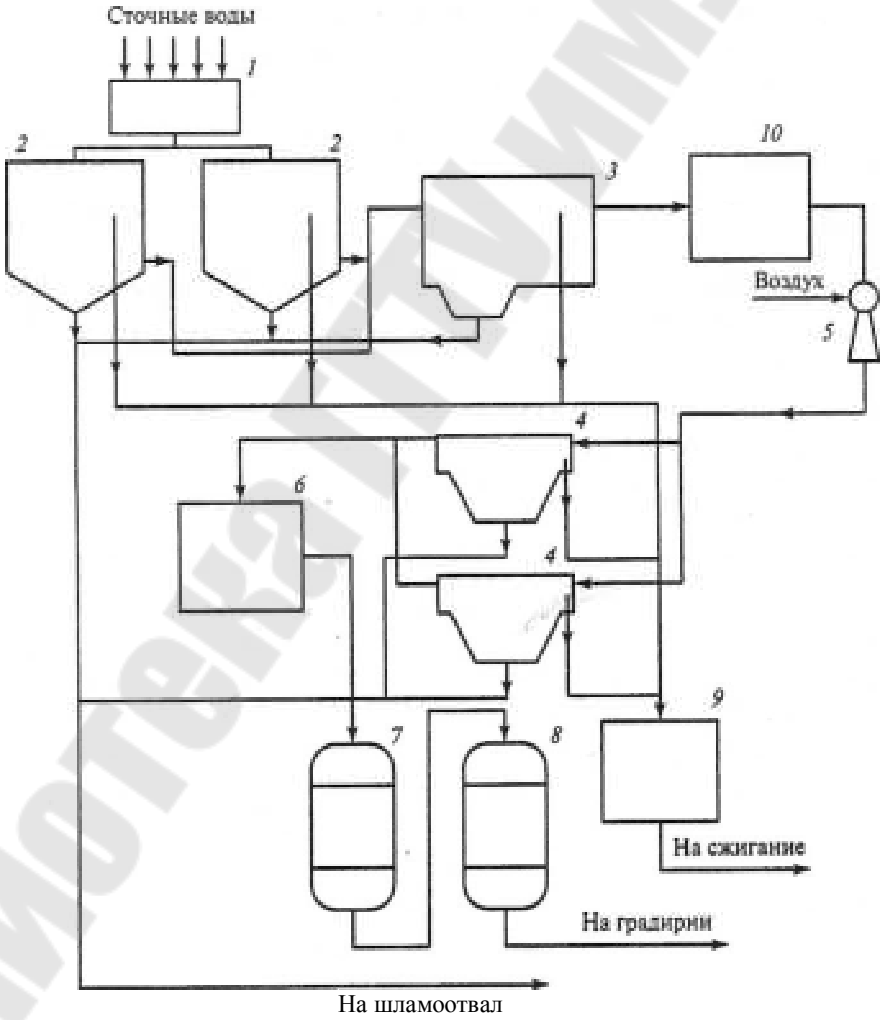


Рис. 8.1. Установка очистки вод от нефтепродуктов

Библиотека ГГТУ им. П.О.Сухого

В качестве второй ступени рекомендуется применять малогабаритные тонкослойные многоярусные нефтеловушки *3*, после которых вода собирается в баках *10*. После нефтеловушек или вместо них можно использовать многокамерные флотаторы *4*. Для насыщения воды воздухом перед флотацией применяют флотационные насосы или эжекторы *5*. Остаточная массовая концентрация нефтепродуктов после флотаторов снижается до 10–15 мг/кг.

Вода собирается в промежуточном баке *6* и подается на механические фильтры *7*, загруженные антрацитом фракции 0,5–1,5 мм. Оптимальная скорость фильтрации равна 5,0–6,5 м/ч, а остаточная концентрация нефтепродуктов после этих фильтров обычно составляет 4–5 мг/кг. Завершающая стадия очистки осуществляется на фильтрах *8* с активированным углем. Возможно применение намывных фильтров с использованием в качестве фильтрующих материалов вспученного перлита, угольной пыли, а также их смеси. Скорость фильтрации принимается равной 5,0–6,5 м/ч, а остаточная концентрация нефтепродуктов в сточных водах после этих фильтров не превышает 1 мг/кг.

Регенерация механических и угольных фильтров *7* и *8* осуществляется с использованием пара давлением 0,4–0,5 МПа и температурой 150–160 °С, а также сжатого воздуха, подаваемого со скоростью 15 м/ч в течение 20–30 мин. Образующиеся при отмывке сточные воды собираются в промежуточные емкости и после снижения температуры подаются в распределительную камеру *1*.

Отделенные нефтепродукты собираются в баке *9*, откуда их подают в расходные баки мазутного хозяйства и сжигают в котлах. Осадки, выделившиеся при очистке воды, складируются на шламоотвале с водонепроницаемым основанием, рассчитанным на прием шлама в течение 5 лет. Вывоз осадка из шламонакопителя осуществляется по согласованию с санитарной инспекцией. Ведутся работы по переработке таких осадков, в том числе с получением торфа, используемого при озеленении территории.

Степень очистки сточных вод достигает 95 % и мало зависит от исходной концентрации нефтепродуктов, т. е. для получения остаточной концентрации 0,05 мг/кг (ПДК для рыбохозяйственных водоемов) на очистку должны поступать сточные воды с концентрацией нефтепродуктов не более 1 мг/кг, что практически не встречается в условиях работы ТЭС.

Библиотека ГГТУ им. П.О.Сухого

При исходной концентрации нефтепродуктов 20 мг/кг ее можно снизить до 1 мг/кг и использовать повторно в схемах ВПУ, прежде всего при наличии известкования и коагуляции.

Трудности в реализации существующих схем очистки связаны с их громоздкостью, слабой автоматизацией, отсутствием отечественных приборов для автоматического контроля за содержанием нефтепродуктов. На многих ТЭС существуют проблемы, связанные с поступлением на очистные сооружения слишком большого количества сточных вод, значительно превышающего расчетное, и обусловленные нарушениями при эксплуатации систем водопользования.

Для сокращения объемов замасленных и замазученных вод следует вводить мероприятия по предотвращению попадания нефтепродуктов в сточные воды ТЭС. Прежде всего, рекомендуется создание маслоплотного оборудования (в том числе маслоохладителей), применение густых смазок, повышение культуры эксплуатации и ремонта оборудования, создание самостоятельных систем охлаждения такого оборудования. Следует предусматривать устройство защитных кожухов на масло- и мазутопроводах, обортовки и поддонов в местах установки маслонасосов и маслобаков, установку баков сбора масла из поддонов и от защитных кожухов и мазута от кожухов мазутопроводов, обортовку площадок ремонта оборудования, исключение попадания мазута в конденсат подогревателей, подачу обводненного мазута для сжигания в котлах без отделения содержащейся в нем воды, предотвращение фильтрации мазута в грунт из резервуаров и сливных лотков.

В систему отведения сточных вод, загрязненных нефтепродуктами, необходимо направлять воды охлаждения подшипников и уплотнений сальников насосов и других вращающихся механизмов, дренажные воды полов главного корпуса и вспомогательных помещений, которые могут содержать нефтепродукты, сливы от сети аварийных маслостоков, дождевые и талые воды от открытых складов масла, мазута, дизельного топлива и других территорий, загрязняемых в процессе эксплуатации, конденсат с концентрацией мазута более 5 г/м^3, отмывочные воды фильтров конденсатоочистки. Система отведения таких сточных вод должна быть полностью изолирована.

После очистки сточные воды необходимо использовать на технологические нужды электростанции вместо природной воды (водоподготовительные установки, подпитка систем оборотного водоснабжения и т. п.). Если для охлаждения вращающихся механизмов ис-

Библиотека ГГТУ им. П.О.Сухого

пользуется вода из СОО с градирнями, воду следует возвращать в систему охлаждения после очистки от нефтепродуктов.

8.5. Обезвреживание и повторное использование обмывочных вод регенеративных воздухонагревателей и конвективных поверхностей нагрева котлов

Существуют типовые решения по созданию оборотной системы использования таких вод с разработанной и апробированной на многих ТЭС технологией извлечения соединений ванадия и никеля в одну или две стадии. При обработке в одну стадию обмывочные воды обрабатывают известковым молоком до pH = 9,0–9,5 и отделяют образующийся шлам, содержание V_2O_5 в котором достигает 5 %. Недостаток одноступенчатой обработки заключается в повышенном содержании гипса в таком шламе (более 50 %), что ограничивает возможность его использования для легирования сталей.

При обработке обмывочных вод в две ступени на первом этапе добавляют гидроксид натрия до pH = 4,5–5,0. Объем шлама после 5–6-часового отстаивания составляет в среднем 20 % объема обмывочной воды и содержит до 5,5 % твердого вещества, в том числе, %:

– соединения ванадия……...20–30
– соединения железа……40–60
– гипс……6–10
– другие вещества……..10–20

Осветленную воду перекачивают во второй бак-нейтрализатор и обрабатывают известковым молоком до pH = 9,5–10,0. После 7–8-часового отстаивания объем шлама составляет около 25 % объема обработанной воды, а концентрация твердого вещества достигает 9 %.

Основные компоненты этого шлама, %:

– соединения железа……..35–40
– соединения никеля и меди……2–3
– гипс……..40–55
– другие вещества……..10–15

Кроме того, в осадке содержится инертная часть известкового молока.

Повышенное содержание ванадия в шламе, полученном на первой ступени, упрощает его использование в металлургии.

Экспериментально отработана технология, включающая в себя нагрев воды до кипения при добавлении соды и окислителей (pH = 1,4–2). При этом концентрация V_2O_5 в осадке достигает 60 %.

Библиотека ГГТУ им. П.О. Сухого

Шлам после второй стадии обработки направляется на шламонакопитель с противофильтрационным покрытием, объем которого рассчитывается на 10 лет работы ТЭС на полной проектной мощности. Осветленная вода после второй ступени обработки и из шламонакопителя используется снова для обмывки. Эти воды имеют обычно pH от 9,5 до 10,0 и содержат около 2 кг сульфата кальция на 1 м. Концентрация ванадия, никеля, меди и железа в них обычно не превышает 0,1 г/м. Однако в связи с использованием едкого натра на первой стадии обработки в этих водах происходит накопление сульфата натрия.

При обмывке пиковых котлов на пылеугольных ТЭС для нейтрализации применяют известковое молоко или известковый шлам осветлителя. Нейтрализованную воду и шлам допускается направлять в систему гидрозолоудаления при условии ее работы по замкнутой оборотной схеме и соблюдения водного баланса системы. Система отведения обмывочных вод должна быть полностью изолированной и не иметь связи с другими системами водоотведения и выпуском вод в водоисточник. При несоблюдении этих условий для хранения шламов сооружается отдельный недренируемый шламонакопитель.

Недостаток существующих технологических схем – трудности соблюдения техники безопасности, что связано с повышенной токсичностью сточных вод и шламов.

8.6. Сокращение количества и обезвреживание сточных вод химических промывок и консервация оборудования

Конкретная схема очистки сточных вод такого типа зависит от состава примесей в воде, который определяется принятыми методами химической очистки и консервации. При обезвреживании сточных промывочных вод основной задачей является разрушение образовавшихся при промывках комплексов металлов с реагентами, выделение металлов в осадок и разрушение органических соединений.

В существующих технологических схемах предусмотрены сбор и нейтрализация отработанных растворов в специальных баках-нейтрализаторах, объем которых рассчитывается на прием всех промывочных растворов в количестве не менее десятикратного объема промываемого контура.

Для сбора стоков от операции водных промывок, являющихся частью технологии химической очистки, сооружаются специальные открытые резервуары в виде бассейнов с двумя секциями: одна для

Библиотека ГГТУ им. П.О.Сухого

отстаивания сточных вод от механических примесей, а другая для сбора полученной в первой секции осветленной воды, которую можно использовать повторно в циклах ТЭС.

Обезвреживание и нейтрализация промывочных растворов осуществляются в баках-нейтрализаторах с применением различных реагентов.

Осаждение соединений железа происходит при обработке известковым молоком до соответствующего значения pH:

– растворов, содержащих соляную и серную кислоту с фторидами, до pH = 10,0;

– растворов после очистки фталевой кислотой до pH = 11,0;

– растворов после очистки композициями на основе комплексонов до pH = 11,5 после их аэрации в течение не менее двух суток.

8.7. Очистка и утилизация грунтовых, ливневых и талых сточных вод с территории тепловых электрических станций

Технология обработки и пути утилизации таких сточных вод зависят от их количества и конкретного состава. Возможна их подача в системы ГЗУ или СОО, допускается сброс в водоемы, если их состав близок к составу воды в этом водоеме.

Основные загрязнители этого типа сточных вод – нефтепродукты и взвешенные вещества.

В целях уменьшения выноса загрязняющих веществ с поверхностным стоком необходимо предусматривать различные организационные мероприятия: исключение сброса в дождевую канализацию загрязняющих веществ; организацию регулярной уборки территории; проведение своевременного ремонта дорожных покрытий; ограждение зон озеленения бордюрами, исключающими смыв грунта во время ливневых дождей на дорожные покрытия; упорядочение складирования нефтепродуктов, кислот, щелочей, солей и других веществ, которые могут загрязнять поверхностный сток и др.

Система отведения поверхностных сточных вод с территории электростанции должна быть, как правило, самостоятельной и не иметь связи с другими системами водоотведения (до очистки поверхностного стока).

При проектировании систем отведения поверхностного стока необходимо предусматривать его очистку и обязательное использование вместо природной воды. На большинстве действующих ТЭС отсутствует система очистки этих сточных вод.

Библиотека ГГТУ им. П.О. Сухого

Другой способ очистки сточных вод – сбор в специальные емкости и очистка на установках, включающих в себя отстойники и фильтры, загруженные антрацитом или активированным углем. Ширина отстойника (или его секции) принимается в пределах 3–9 м, а длина должна быть больше его высоты в 10 раз и более. Высоту зоны отстаивания принимают в пределах 2–3,5 м, а высоту нейтральной зоны над уровнем осадка 0,4–0,5 м. Отстойник должен быть оборудован устройствами для равномерного (по ширине) впуска и выпуска сточных вод, а также устройствами для задержания и периодического удаления всплывающих примесей (нефтепродуктов) и накапливающегося осадка. Всплывающие примеси отводятся в специальные сборники, где выдерживаются в течение нескольких суток для отделения нефтепродуктов. Нефтепродукты направляются на сжигание, а вода и шлам – обратно в отстойник.

Библиотека ГГТУ им. П.О.Сухого

Литература

1. Повышение экологической безопасности тепловых электростанций : учеб. пособие / А. И. Абрамов [и др.]. – Москва: МЭИ, 2001. – 378 с.

2. Щинников, П. А. Природоохранные технологии на ТЭС и АЭС : учеб. пособие / П. А. Щинников. – Новосибирск : НГТУ, 2006.

3. Сигал, И. Я. Защита воздушного бассейна при сжигании топлива / И. Я. Сигал. – 2-е изд., перераб. и доп. – Ленинград : Недра, 1988. – 312 с.

4. Котлер, В. Р. Оксиды азота в дымовых газах котлов / В. Р. Котлер. – Москва : Энергоатомиздат, 1987. – 144 с.

5. Охрана окружающей среды и природопользование. Мониторинг окружающей среды. Правила организации и проведения непрерывного мониторинга выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух : ТПК 17.08-04-2006 (02120). – Введ. постановлением Минприроды РБ от 28.06.2006 г. № 3-Т. – Минск : РУП «БелНИЦ «Экология».

Библиотека ГГТУ им. П.О.Сухого

Содержание

ВВЕДЕНИЕ 3
Тема 1. ЭНЕРГЕТИКА И ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА 5
1.1. Воздействие тепловых электрических станций на окружающую среду и человека 5
1.2. Лимиты на природопользование 9
1.3. Влияние вредных выбросов тепловых электрических станций на природу и человека 13
Тема 2. ВЫБРОСЫ ЗОЛОВЫХ ЧАСТИЦ С ДЫМОВЫМИ ГАЗАМИ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ В АТМОСФЕРУ ... 16
2.1. Характеристики летучей золы 16
2.2. Типы и характеристики золоуловителей 18
2.3. Инерционные золоуловители 20
2.4. Мокрые золоуловители 25
2.5. Электрофильтры 27
2.6. Золоотвалы, использование и утилизация золы 29
Тема 3. ВЫБРОСЫ ОКСИДОВ АЗОТА С ДЫМОВЫМИ ГАЗАМИ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ В АТМОСФЕРУ 35
3.1. Влияние оксидов азота на окружающую среду. Нормативы выбросов оксидов азота 35
3.2. Механизмы образования оксидов азота 38
3.3. Первичные мероприятия, направленные на уменьшение выбросов NO_x 41
3.4. Вторичные мероприятия по уменьшению выбросов NO_x 46
Тема 4. ВЫБРОСЫ СОЕДИНЕНИЙ СЕРЫ С ДЫМОВЫМИ ГАЗАМИ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ В АТМОСФЕРУ ... 50
4.1. Влияние оксидов серы на окружающую среду 50
4.2. Очистка топлива от соединений серы до его сжигания 52
4.3. Очистка топлива от соединений серы в процессе горения 53
4.4. Очистка дымовых газов от соединений серы 55
Тема 5. ВЫБРОСЫ ВОДЯНОГО ПАРА В АТМОСФЕРУ 64
5.1. Система охлаждения конденсаторов турбин 64
5.2. Системы оборотного охлаждения с градирнями 65
5.3. Выбросы водяного пара с дымовыми газами в атмосферу 66
Тема 6. ВЫБРОСЫ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ ОТ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ В АТМОСФЕРУ 67
6.1. Влияние углекислого газа на климат Земли 67
6.2. Способы ограничения выброса углекислого газа в атмосферу от тепловых электрических станций 68
6.3. Сжигание ископаемых топлив с малым содержанием углерода 68

Библиотека ГГТУ им. П.О. Сухого

6.4. Энергосбережение 69
6.5. Использование возобновляемых источников энергии 70
6.6. Теплофикация 72
6.7. Реализация технических решений, повышающих коэффициент полезного действия тепловых электрических станций как путь снижения выбросов CO_2 72
Тема 7. РАССЕИВАНИЕ В АТМОСФЕРЕ ВЫБРОСОВ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ. МОНИТОРИНГ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ 73
7.1. Дымовые трубы 73
7.2. Контроль состава и концентрации вредных веществ в уходящих газах котлов 75
7.3. Автоматизированная система мониторинга выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух 78
Тема 8. СТОЧНЫЕ ВОДЫ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ И ИХ ОЧИСТКА 83
8.1. Классификация сточных вод тепловых электрических станций 83
8.2. Влияние сточных вод тепловых электрических станций на природные водоемы 87
8.3. Основные направления сокращения водопотребления и сброса сточных вод 89
8.4. Очистка и утилизация сточных вод, загрязненных нефтепродуктами 91
8.5. Обезвреживание и повторное использование обмывочных вод регенеративных воздухонагревателей и конвективных поверхностей нагрева котлов 94
8.6. Сокращение количества и обезвреживание сточных вод химических промывок и консервация оборудования 95
8.7. Очистка и утилизация грунтовых, ливневых и талых сточных вод с территории тепловых электрических станций 96
Литература 98

Библиотека ГГТУ им. П.О. Сухого

Учебное электронное издание комбинированного распространения

Учебное издание

Овсянник Наталья Владимировна
Широглазова Наталия Владимировна

ЭКОЛОГИЯ ЭНЕРГЕТИКИ

Курс лекций по одноименной дисциплине для студентов специальностей 1-43 01 05 «Промышленная теплоэнергетика» дневной и заочной форм обучения и 1-43 01 07 «Техническая эксплуатация энергооборудования организаций» дневной формы обучения

Электронный аналог печатного издания

Редактор *Н. И. Жукова*
Компьютерная верстка *Е. Н. Баженова*

Подписано в печать 09.11.2010.
Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».
Ризография. Усл. печ. л. 5,81. Уч.-изд. л. 6,3.
Изд. № 21.
E-mail: ic@gstu.by
http://www.gstu.by

Издатель и полиграфическое исполнение:
Издательский центр учреждения образования
«Гомельский государственный технический университет
имени П. О. Сухого».
ЛИ № 02330/0549424 от 08.04.2009 г.
246746, г. Гомель, пр. Октября, 48.

Библиотека ГГТУ им. П.О. Сухого