



Министерство образования Республики Беларусь

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

Кафедра «Промышленная теплоэнергетика и экология»

Н. В. Овсянник

ЭКОЛОГИЯ ЭНЕРГЕТИКИ

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ
по одноименному курсу**

для студентов специальности 1-43 01 05

**«Промышленная теплоэнергетика»
дневной формы обучения**

Электронный аналог печатного издания

Гомель 2008

УДК 504.3:621.3(075.8)
ББК 20.1я73
О-34

*Рекомендовано к изданию научно-методическим советом
энергетического факультета ГГТУ им. П. О. Сухого
(протокол № 6 от 11.06.2007 г.)*

Рецензент: канд. техн. наук, доц. каф. «Обработка материалов давлением»
ГГТУ им. П. О. Сухого *Н. И. Стрикель*

Овсянник, Н. В.

О-34 Экология энергетики : лаб. практикум по одноим. курсу для студентов специальности 1-43 01 05 «Промышленная теплоэнергетика» днев. формы обучения / Н. В. Овсянник. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2008. – 41 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://gstu.local/lib>. – Загл. с титул. экрана.

ISBN 978-985-420-670-7.

Рассмотрены вопросы, связанные с вредными выбросами от ТЭУ в атмосферу и гидросферу; приведены лабораторные анализы, позволяющие количественно измерить эти выбросы и способы их расчета.

Для студентов специальности 1-43 01 05 «Промышленная теплоэнергетика» дневной формы обучения.

**УДК 504.3:621.3(075.8)
ББК 20.1я73**

ISBN 978-985-420-670-7

© Овсянник Н. В., 2008
© Учреждение образования
«Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого», 2008

Лабораторная работа № 1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ, ОКСИДОВ ВАНАДИЯ И ЗОЛЫ В ДЫМОВЫХ ГАЗАХ ТЕПЛОЭНЕРГОУСТАНОВОК

Цель работы: расчет выбросов твердых веществ в атмосферу при работе ТЭУ.

Общие сведения

Можно выделить следующие виды загрязнения окружающей среды объектами теплоэнергетики:

- выбросы в атмосферу в виде пыли, оксидов углерода, серы, азота;
- твердые отходы (зола, шлаки);
- сброс отработанной воды, содержащей нефтепродукты, взвеси, растворимые соединения металлов;
- тепловые выбросы;
- шумовое воздействие;
- влияние электромагнитных полей линий электропередач.

Наиболее типичные примеси, содержащиеся в золах углей, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Содержание типичных примесей в золах углей

Наименование	Содержание в золе, %	Наименование	Содержание в золе, г/т
Окись кальция	1,7–42	Свинец	10–210
Свободная окись кальция	0,03–23	Мышьяк	15–110
Окись кремния	3–65	Ванадий	10–170
Свободная окись кремния	5–33	Хром	16–150
		Цинк	30–400

Распределение некоторых элементов в различных по размерам частицах неравномерно и обычно увеличивается с уменьшением размеров частиц. К таким элементам относятся: свинец, цинк, таллий, германий, сурьма, мышьяк, сера. В связи с этим более мелкая зола, не уловленная золоуловителями и поступающая в атмосферу, содер-

жит больше перечисленных элементов, чем средняя по составу зола исходного топлива. Большинство элементов и их соединений при температуре уходящих газов 130–150 °С находится в твердом состоянии и улавливается вместе с золой в золоуловителях. Ряд элементов обладает высокой токсичностью. Предельно допустимая концентрация нетоксичной пыли, к которой обычно приравнивается зола энергетических топлив, не должна превышать $ПДК_{м.р} = 0,5 \text{ мг/м}^3$ и $ПДК_{с.с} = 0,15 \text{ мг/м}^3$. С учетом этого требования к очистке от золы дымовых газов обычно бывают выше, чем это обусловлено ПДК для нетоксичной пыли. Например, мышьяк практически весь остается в золе и шлаке. Соединения мышьяка лишь в очень незначительной степени выщелачиваются из золы водой при транспортировке пульпы на золоотвал. Соединения фтора переходят в воду. Таким образом, осветленная вода, как правило, при сжигании большинства твердых топлив содержит фтор-ион в количествах, превышающих ПДК для водоемов.

Нарушение режимов горения топлива приводит к образованию продуктов неполного сгорания: окиси углерода, сажи, смолистых веществ, содержащих полициклические ароматические углеводороды (ПАУ), в частности, самый токсичный из них, обладающий канцерогенностью – бенз(а)пирен. Количество ПАУ, поступающих в атмосферу с дымовыми газами, в значительной степени зависит от качества и вида сжигаемого топлива; угольные брикеты дают выброс ПАУ в 4–8 раз больше, чем уголь; выброс ПАУ гораздо меньше при сжигании жидкого топлива и минимален при сжигании газа. Он существенно зависит от режима сжигания: при химическом недожоге количество ПАУ в дымовых газах может возрасти в 10–50 раз за счет содержания их в саже. Концентрация бенз(а)пирена в продуктах сгорания резко снижается с ростом коэффициента избытка воздуха. ПАУ из атмосферы выпадают в водоемы и почву, обладая свойством накапливаемости в донных отложениях, растениях и живых организмах. В настоящее время доказано влияние ПАУ на здоровье будущих поколений. Доказано, что частота заболеваний человека злокачественными опухолями (рак легких) тесно связана с содержанием ПАУ, наибольшая часть этих заболеваний наблюдается в городах и промышленных центрах.

Удаление золошлаковых отходов связано с отторжением территорий. Если ТЭС средней мощности занимает 200–300 га, то площадь золоотвала через 10 лет эксплуатации достигает 800–1500 га. При

сжигании 2500 т угля в час образуется 1000 т золы. Учитывая, что по ряду токсичных элементов зола ТЭС значительно превышает их среднее содержание в земной коре – мышьяк в 100 раз, бериллий в 60 раз, следует считать золошлакоотвалы источником повышенной экологической опасности.

На выбор золоуловителей влияет ряд факторов: вид топлива и способ его сжигания, физико-химические свойства золы, возможность размещения газоочистного оборудования на реконструируемых ТЭС. Данные о золоуловителях различных типов приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Структура золоулавливающих устройств,
используемых на ТЭС**

Тип золоуловителя	Производительность котлов, т/ч				
	Менее 100	101–200	201–320	321–640	Более 640
Сухие инерционные	40	28	13	–	–
Мокрые инерционные	53	59	62	66	–
Электрофилтры	7	13	25	34	100
Всего, %	100	100	100	100	100

Батарейные циклоны относятся к сухим механическим золоулавливающим аппаратам, очистка газов в которых достигается в результате воздействия на твердые частицы сил инерции, возникающих при вращении газового потока в циклонных элементах. Батарея состоит из большого числа параллельно установленных циклонных элементов, имеющих диаметр 150–300 мм. Батарейные циклоны устанавливаются, как правило, перед дымососами, когда помимо сокращения твердых выбросов обеспечивается защита от абразивного износа летучей золой, или перед электрофилтрами батарейных циклонов, обладающих более высокими степенями очистки. Противопоказанием для применения батарейных циклонов является сильная слипаемость пыли, приводящая к их забиванию.

Мокрый способ очистки прост и достаточно эффективен. В нем используется центробежный принцип в чистом виде или в сочетании с инерционным осаждением взвешенных частиц на орошаемых решетках или каплях распыленной жидкости при обтекании их запыленным потоком. Наиболее широкое применение среди аппаратов мокрого золоулавливания нашли золоуловители с трубами (коагуляторами) Вентури. В них происходит предварительное улавливание га-

зов с помощью коагулятора в виде трубы Вентури. Основным достоинством этих аппаратов является сравнительно высокая и стабильная степень очистки газов от золы, составляющая 95–96 %, относительно небольшие капитальные и эксплуатационные затраты, возможность при определенных условиях осуществлять питание аппаратов оборотной осветленной водой. Тканевые (рукавные) фильтры – новое средство очистки – результат появления высокопрочных синтетических и минеральных волокон. Эффективность очистки – 99,9 %. Очистка ткани производится встряхиванием, обратной продувкой. Расходы по установке равны или ниже, чем с электрофильтрами. Главный недостаток – большие размеры и малый срок службы.

Электрофильтры позволяют добиться высоких степеней очистки газов (99,9 %) при гидравлическом сопротивлении не более 150 Па без снижения температуры и увлажнения дымовых газов. В корпусе электрофильтра располагаются коронирующие и осадительные электроды. К первым подведен ток высокого напряжения отрицательного знака, а вторые заземлены. Между электродами создается неравномерное электрическое поле, имеющее наивысшую напряженность у поверхности коронирующих электродов. В этом месте происходит местный пробой и возникает коронный разряд, являющийся источником интенсивной эмиссии электронов. Электроны и образовавшиеся в результате их движения газовые ионы при своем перемещении в электрическом поле к заземленному осадительному электроду сорбируются частицами золы и сообщают последним отрицательный заряд. Заряженные частицы золы под действием электрического поля двигаются поперек газового потока и осаждаются на заземленных электродах, отдавая им свои заряды. Осевшая зола периодически встряхивается с электродов и поступает в бункер, а из него – в систему пневмо- или гидрозолоулавливания. Размещают электрофильтры перед воздухоподогревателем в области температур газов около 350–400 °С, что предотвращает загрязнение золой воздухонагревателя. Недостаток – потери тепла с «горячей» уловленной золой.

Кроме вышперечисленного, широкое применение находит конденсирование дымовых газов. Способ заключается в изменении их свойств при добавлении к ним химических веществ или водяного пара, адсорбирующихся или конденсирующихся на поверхности частиц золы и увеличивающих их поверхностную проводимость. В качестве добавок используют серный ангидрид, водяной пар, аммиак.

Порядок выполнения работы

Расчет выбросов твердых частиц летучей золы и несгоревшего топлива (т/год, г/с, ...), выбрасываемых в атмосферу с дымовыми газами котлоагрегата в единицу времени при сжигании твердого топлива и мазута, выполняется по формуле

$$M_{\text{ТВ}} = B \cdot A^{\Gamma} \cdot x(1 - h),$$

где B – расход топлива (т/год, г/с); A^{Γ} – зольность топлива (%); h – доля твердых частиц, улавливаемых в золоуловителях.

$$x = a_{\text{УН}} / (100 - \Gamma_{\text{УН}}),$$

где $a_{\text{УН}}$ – доля золы топлива в уносе (%); $\Gamma_{\text{УН}}$ – содержание горючего в уносе (%).

Значения A^{Γ} , $\Gamma_{\text{УН}}$, $a_{\text{УН}}$, h – принимаются по фактическим средним показателям; при отсутствии этих данных A^{Γ} определяется по характеристике сжигаемого топлива; x – зависит от типа топки, вида топлива.

Для мазута паровые и водогрейные котлы с камерными топками $x = 0,01$, $a_{\text{УН}} = 0,95$ %.

$A^{\Gamma} = 0,03$ % (обычно зольность топлива на ТЭУ определяют подекадно, откуда выводят среднюю за месяц).

h – условно принимается за 0 для мазута и газа, т. к. она равна 0,00053.

У большинства котлоагрегатов расчет выбросов твердых частиц летучей золы производится по формуле

$$M_{\text{ТВ}} = 0,01 \cdot B \left(a_{\text{УН}} \cdot A^{\Gamma} + q_{\text{УН}} \cdot \frac{Q_{\text{Н}}^{\Gamma}}{7800} \right) \cdot (1 - h_3),$$

где B – расход сухого мазута (газа); $a_{\text{УН}}$ – доля золы в уносе (принимается 0,95 %); A^{Γ} – зольность топлива (0,03 % мазута); $q_{\text{УН}}$ – механический недожог, принимается 0,02 %; $Q_{\text{Н}}^{\Gamma}$ – низшая теплота сгорания; h_3 – доля твердых частиц, улавливаемая в золоуловителе котла (принимается 0).

Расчет выбросов оксидов ванадия в пересчете на пентаксид ванадия (т/год, г/с, ...) выполняется по формуле

$$M_{V_2O_5} = 10^{-6} \cdot G_{V_2O_5} \cdot B \cdot (1 - h_{oc}) \cdot (1 - h_{ул}), \text{ г/т},$$

где $G_{V_2O_5}$ – содержание оксидов ванадия в жидком топливе в пересчете на V_2O_5 (г/т); h_{oc} – коэффициент оседания оксидов ванадия на поверхностях нагрева котлов. Для котлов с промежуточными пароперегревателями, очистка поверхности которых производится в остановленном состоянии, $h_{oc} = 0,07$, для котлов без промежуточных пароперегревателей $h_{oc} = 0,05$, для остальных случаев $h_{oc} = 0$; $h_{ул}$ – доля твердых частиц продуктов сгорания жидкого топлива, уловленных в устройстве для очистки газов мазутных котлов.

При отсутствии анализов топлива $G_{V_2O_5}$ в мазуте с $S^f > 0,4\%$ определяется по формуле

$$G_{V_2O_5} = 95,4 \cdot S^f - 31,6,$$

где S^f – содержание серы в мазуте.

При определении золы из твердых частиц вычитаем окислы ванадия

$$M_{\text{зола}} = M_{\text{тв}} - M_{V_2O_5}.$$

Контрольные вопросы

1. Выбросы, сопровождающие работу ТЭУ.
2. Принцип выбора золоуловителя.
3. Почему зола экологически опаснее исходного топлива?
4. Принцип работы электроосадителя.
5. «Мокрые» и «сухие» способы очистки дымовых газов.

Лабораторная работа № 2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ СЕРНИСТЫХ СОЕДИНЕНИЙ В ДЫМОВЫХ ГАЗАХ ТЕПЛОЭНЕРГОУСТАНОВОК

Цель работы: расчет выбросов сернистых соединений в пересчете на SO_2 при работе ТЭУ.

Общие сведения

Диоксид серы является одним из основных загрязнителей атмосферы в результате деятельности человека. Главным источником выбросов сернистых соединений является энергетика.

Таблица 1

Допустимые концентрации SO_2

Страна	Среднегодовая концентрация, мг/м^3	Среднесуточная концентрация, мг/м^3	Максимальная разовая, мг/м^3
Австрия	0,05–0,10	0,07–0,15	0,5
Бельгия	0,08–0,18	0,25–0,35	0,5
Болгария	–	0,05	0,5
Япония	–	0,1	0,26
Югославия	–	0,15	0,5
Канада	0,03–0,06	0,15–0,8	0,45–0,8
США	0,08	0,365	1,3
СНГ	0,02–0,05	0,5	2,5
Швейцария	0,06	–	0,3
Швеция	0,1	0,3	–

Таблица 2

Структура выбросов SO_2 тепловыми электростанциями (%)

Составляющие суммарного выброса	Относительный выброс SO_2	
	1980	1990
От сжигания всех видов твердого топлива	61,6	77,9
От сжигания сернистого мазута	38,4	22,1
Итого:	100	100

Минимальные значения концентраций означают желаемый уровень эмиссии SO_2 , а максимальные значения – приемлемый уровень, который еще может допускаться (табл. 1).

Снижение использования в теплоэнергетике мазута привело к сокращению вклада в выбросы SO_2 ТЭС, работающих на мазуте (табл. 2). Помимо организационных общеэнергетических мероприятий с перераспределением топливных ресурсов (значительная часть природного газа отправляется в европейскую часть СНГ) имеются и мероприятия, предназначенные непосредственно для уменьшения выбросов двуокиси серы. К ним традиционно относятся:

1. Предварительное извлечение серы в результате механического, химического или иного обогащения жидкого и твердого топлива.
2. Связывание серы в процессе сжигания топлива.
3. Сероочистка дымовых газов.

Для твердого топлива – это гидротермальная обработка (водяной пар или водород плюс катализатор), мокрые методы физического обогащения (измельчение и разделение методами, основанными на разности плотностей или поверхностных свойств), системы воздушной сепарации, системы магнитной сепарации (измельчение до 1000 мкм угля и извлечение колчедана). Органическую среду отделяют процессами окисления и обработки щелочами.

Наиболее отработанным в промышленности методом очистки жидкого топлива от серы является метод косвенного обессеривания (вакуумное отделение тяжелой части нефти, гидрообессеривание легких компонентов с последующим смешением с частью тяжелых остатков).

Сжигание топлива без давления в котлах с топками кипящего слоя (КС) дает возможность уловить до 80 % диоксида серы (стационарный кипящий слой), при использовании более совершенного метода – циркуляционного КС (более мелкие частицы циркулируют в системе циклонов) получают более высокую степень очистки от диоксида серы.

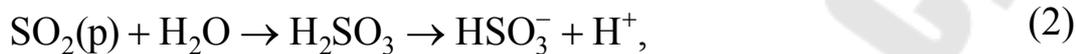
Перспективным является использование КС под давлением, что позволяет улавливать до 90 % SO_2 .

Другим направлением в экологически чистом использовании углей является создание парогазовых установок с внутрицикловой газификацией углей (ПГУ).

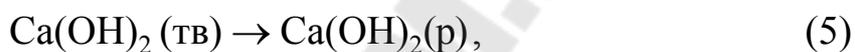
В очистке дымовых газов наиболее распространенным является метод с прямой абсорбцией диоксида серы из отходящих газов с по-

мощью извести или известняка. Кроме этого используется абсорбция на активированном угле, каталитическое восстановление и окисление, и другие способы.

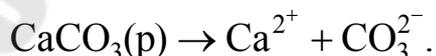
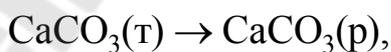
При абсорбции жидкости в известковом процессе происходят следующие реакции:



Известь в шламе вступает в следующие реакции:



Химия известнякового процесса отличается от химии известкового только тем, что ион кальция, связывающий SO_2 , высвобождается иначе:



Остальные реакции совпадают с известковым процессом.

Расчет выбросов оксидов серы в пересчете на SO_2 (т/год) выполняется по формуле

$$M_{\text{SO}_2} = 0,02 \cdot B \cdot S^{\text{г}} (1 - h'_{\text{SO}_2}) (1 - h''_{\text{SO}_2}),$$

где B – расход твердого, жидкого (т/год) и газообразного топлива (тыс. м³/год); $S^{\text{г}}$ – содержание серы в топливе (%) (сернистость), мг/м³;

h'_{SO_2} – доля оксидов серы, связываемых летучей золой в котле; h''_{SO_2} – доля оксидов серы, улавливаемых в золоуловителе попутно с твердыми частицами.

Доля оксидов серы, связываемых летучей золой в котле, зависит от зольности топлива и содержания свободной щелочи в летучей золе.

Ориентировочные значения h'_{SO_2} при сжигании различных видов топлива:

торф.....	0,15
сланцы.....	0,8

Для оксидов серы, связываемых летучей золой в котле, зависит от зольности топлива и содержания свободной щелочи в летучей золе.

Ориентировочное значение h''_{SO_2} при сжигании различных видов топлива:

торф.....	0,15
сланцы.....	0,8
березовый уголь для топок с твердым шлакоулавливанием.....	0,5
для топок с жидким шлакоулавливанием при низкотемпературном сжигании.....	0,2
Остальные угли:	
для топок с твердым шлакоулавливанием.....	0,2
для топок с жидким шлакоулавливанием при высокотемпературном сжигании.....	0,05
мазут.....	0,02
газ.....	0,0

Под низкотемпературным сжиганием понимается сжигание всех углей с $Q_{\text{H}}^{\text{r}} < 23050$ кДж/кг в топках с твердым шлакоудалением при температуре факела $T_{\text{ф}} < 1500$ °С.

Под высокотемпературным сжиганием понимается сжигание всех углей в топках с жидким шлакоудалением, а также углей с $Q_{\text{H}}^{\text{r}} \geq 23050$ кДж/кг в топках с твердым шлакоудалением при температуре факела $T_{\text{ф}} < 1500$ °С.

Доля оксидов серы (h''_{SO_2}), улавливаемых в сухих золоуловителях (электрофильтрах, батарейных циклонах), принимается равной нулю. В мокрых золоуловителях типа МВ и МС она зависит, в основном, от расхода и общей щелочности орошающей воды и от приведенной сернистости топлива при принятых на тепловых электростанциях удельных расходах воды на орошение золоуловителей $0,1-0,15 \text{ л/м}^3$.

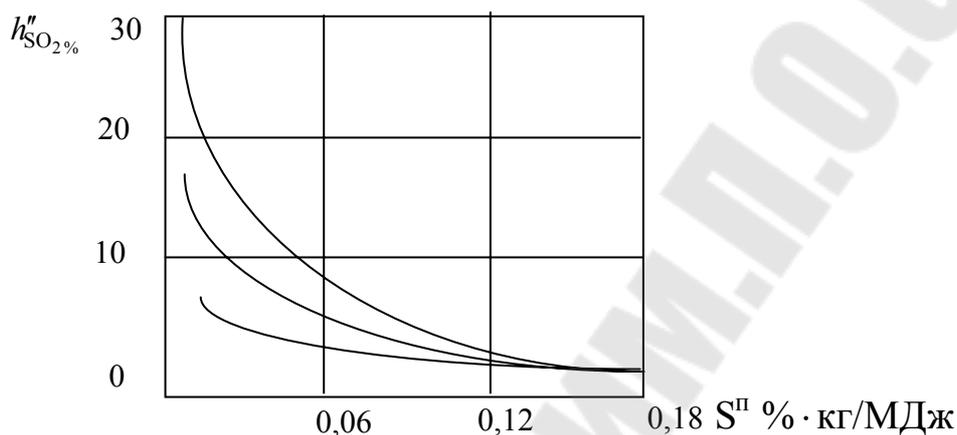


Рис. 1. Степень улавливания оксидов серы в мокрых золоуловителях h'' при щелочности орошаемой воды: 1–10 мг/(моль·л); 2–5 мг/(моль·л); 3–0 мг/(моль·л); S'' – приведенная сернистость топлива

Контрольные вопросы

1. В каких видах сернистые соединения присутствуют в органическом топливе?
2. Способы очистки дымовых газов от сернистых соединений.
3. Связывание серы в процессе сжигания топлива.
4. Абсорбционный метод очистки дымовых газов от SO_2 .

Лабораторная работа № 3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ОКСИДОВ АЗОТА В ДЫМОВЫХ ГАЗАХ ТЕПЛОЭНЕРГОУСТАНОВОК

Цель работы: расчет выбросов оксидов азота в пересчете на NO_2 при работе ТЭУ.

Общие сведения

Загрязнение ТЭС атмосферы оксидами азота представляет одну из самых серьезных проблем в энергетике.

Таблица 1

Выбросы NO_x в пересчете на NO_2 по странам

Страны	Выбросы NO_x (в тыс. т)	
	официальный	оцененный
Болгария	–	174
Германия	943	917
Польша	374	370
СНГ	–	3332
Франция	562	545
Великобритания	543	566

Таблица 2

ПДК оксидов азота в атмосферном воздухе

Страна	ПДК, $\text{м}^2/\text{м}^3$	
	среднесуточная	максимальная разовая
США	0,1	–
Италия	0,2	–
Германия	0,08	0,3 (30 мин)
Япония	0,083–0,123	–
СНГ	0,04	0,085

Для обеспечения норм содержания оксидов азота в атмосферном воздухе требуется повсеместное нормирование выделения оксидов азота на теплоэнергетических установках. Источником оксидов азота может быть молекулярный азот воздуха, используемого в качестве окислителя при горении, или азотосодержащие компоненты топлива.

Содержание азота в большинстве мазутов, поставляемых на отечественные ТЭС, составляет 0,25–0,35 % масс. Это – «топливные» оксиды азота. «Термические» оксиды азота образуются за счет окисления молекулярного азота атомарным кислородом (механизм Зельдовича). «Быстрые» оксиды азота получаются в результате реакции углеводородных радикалов с молекулой азота и последующим взаимодействием атомарного азота с гидроксильной группой в зоне достаточно низких температур (даже при 1600 °С, когда «термические» окислы практически не образуются).

Снижения выбросов окислов азота возможно добиться двумя основными путями:

- технологическое подавление образования;
- обезвреживание отходящих газов.

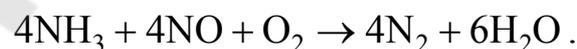
В зависимости от вида топлива применимы различные способы подавления образования окислов азота:

- использование горелок с минимальным образованием окислов азота;
- подача газов рециркуляции в зону горения;
- ступенчатый ввод воздуха в топку;
- трехступенчатое сжигание.

В развитых странах разрабатываются и применяются в промышленности, в основном, три схемы очистки дымовых газов от NO_x :

- 1) гомогенное (некаталитическое) восстановление окислов азота аммиаком (высокотемпературное восстановление);
- 2) каталитическое селективное восстановление с использованием аммиака;
- 3) прямое поглощение оксида азота с одновременной абсорбцией SO_2 .

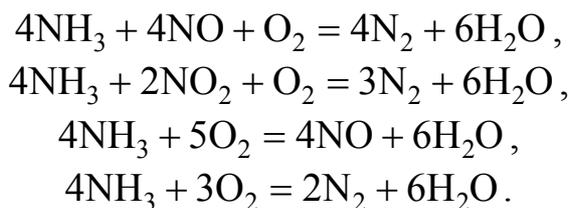
Химизм гомогенного восстановления:



Процесс протекает при t 900–1000 °С.

Каталитические методы очистки делятся на два основных класса: высокотемпературное восстановление (бескислородная среда; восстановители – водород, окись углерода, природный газ, пары керосина; катализаторы – платина, палладий, медно-хромовые сплавы); селективное каталитическое восстановление (СКВ). Особенностью этого процесса является его высокая избирательность.

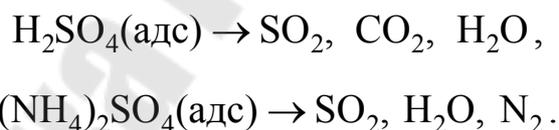
Химизм процесса:



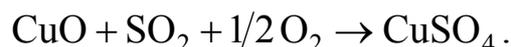
Катализаторы: $\text{V}_2\text{O}_5/\text{Al}_2\text{O}_3$; $\text{V}_2\text{O}_5/\text{TiO}_2$.

Температура: 200–450 °С.

Способы одновременного удаления NO_x и SO_2 являются альтернативой методу СКВ. Наиболее распространен метод сухой очистки от оксидов азота и серы (метод «Berqbau-Forschung»). Процесс основан на использовании неподвижного или движущегося слоя активированного угля, получаемого из измельченного каменного угля и каменноугольной смолы в виде цилиндрических гранул 5 мм. Дымовой газ после воздухоподогревания и электрофилтра пропускают через слой угля для удаления SO_2 . При этом SO_2 окисляется в SO_3 и в присутствии водяного пара превращается в серную кислоту, адсорбирующуюся в порах активированного угля. После этого в обессеренный поток дымовых газов вводится аммиак, и во втором слое активированного угля происходит восстановление NO_x . Активированный уголь регенерируют при температуре 400–500 °С. При этом происходит восстановление сульфатов коксом:



Распространенным методом совместной очистки газов от NO_x и SO_2 является метод фирмы «Шелл». Он основан на циклическом образовании и разложении сульфатов меди, (катализатором используется окись меди, нанесенная на Al_2O_3). При $t = 400$ °С:



Одновременно сульфат меди является катализатором восстановления NO_x аммиаком. При максимальном отложении сульфатов катализатор регенерируют водородом:



Перспективными методами очистки газов от NO_x являются: озонный метод и очистка газов путем облучения электронным пучком (стимуляция химических реакций с помощью электронного пучка).

При каталитическом сжигании топлива, благодаря ускоряющему действию катализатора, реакции окисления протекают при относительно низких температурах, что позволяет избежать образования как термических, так и топливных окислов азота. Концентрация NO_x на выходе не превышает $100\text{--}200 \text{ мг/м}^3$. Температура полного окисления топлива $600\text{--}800 \text{ }^\circ\text{C}$.

Применение газотурбинных установок позволяет перейти к принципиально новым процессам получения электрической и тепловой энергии. В ряде случаев концентрация окислов азота на выходе не превышает 100 мг/м^3 . Дальнейшее развитие метода связано с внутрицикловой газификацией угля, при которой будет вырабатываться очищенный от серы и золы газ, пригодный для дальнейшего использования.

Порядок выполнения работы

Расчет выбросов оксидов азота в пересчете на NO_2 (т/год, г/с, ...) вычисляется по формуле

$$P_{\text{NO}_2} = 0,34 \cdot 10^{-7} \cdot K \cdot B \cdot Q_{\text{H}} \left(1 - \frac{q_4}{100}\right) \cdot \rho_1 (1 - \varepsilon_1 \cdot r) \cdot \beta_2 \cdot \beta_3 \cdot \varepsilon_2,$$

где K – коэффициент, характеризующий выход оксидов азота (кг/т условного топлива); B – расход натурального топлива за период (т/год, тыс. $\text{м}^3/\text{год}$, г/с, л/с); β_1 – коэффициент, учитывающий влияние содержания азота в топливе на выход оксидов азота; β_2 – коэффициент, учитывающий конструкцию горелок (для вихревых $\beta_2 = 1$, для прямоточных $\beta_2 = 0,85$); β_3 – коэффициент, учитывающий вид шлакоудаления; при жидком шлакоудалении $\beta_3 = 1,4$, во всех остальных случаях $\beta_3 = 1$; ε_1 – коэффициент, характеризующий эффективность воздействия рециркулирующих газов в зависимости от условий их подачи в топку; ε_2 – коэффициент, характеризующий снижение выброса оксидов азота при подаче части воздуха помимо основных горелок (при двухступенчатом сжигании), определяется по рис. 1 при условии сохранения общего избытка воздуха за котлами; r – степень рециркуляции дымовых газов (%).

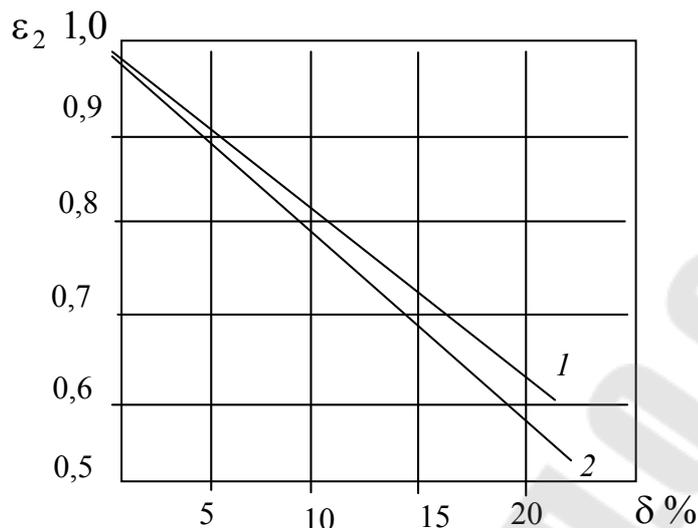


Рис. 1. График для определения значения коэффициента ε_2 :

1 — газ, мазут; 2 — уголь; δ — доля воздуха, подаваемого помимо основных горелок

Коэффициент K для котлов паропроизводительностью более 70 т/ч при сжигании газа и мазута во всем диапазоне нагрузок, а также при высокотемпературном сжигании твердого топлива с нагрузками выше 75 % номинальной определяется по формуле

$$K = \frac{12D_{\text{ф}}}{200 + D},$$

где D и $D_{\text{ф}}$ — номинальная и фактическая паропроизводительность котла (т/ч).

Для котлов паропроизводительностью 30–70 т/ч

$$K = \frac{D_{\text{ф}}}{20 + D}.$$

Для водогрейных котлов мощностью более 125 ГДж/ч (30 Гкал/ч) коэффициент K определяется по формуле

$$K = \frac{2,5 \cdot Q_{\text{ф}}}{84 + Q},$$

где Q , $Q_{\text{ф}}$ — номинальная и фактическая тепловая мощность котла (ГДж/ч).

При высокотемпературном сжигании твердого топлива с нагрузками котла ниже 75 % номинальной в формулы для расчета K вместо D_{ϕ} и Q_{ϕ} подставляется D и Q .

Значения β_1 для энергетических котлов, в которых сжигается твердое топливо, определяются по формуле

$$\beta_1 = 0,178 + 0,47N^r,$$

где N^r – содержание азота в топке (%).

Контрольные вопросы

1. Виды оксидов азота.
2. Уравнение Зельдовича.
3. Технологическое подавление образования NO_x .
4. Способы очистки дымовых газов от NO_x .

Лабораторная работа № 4

ВОДНЫЙ РЕЖИМ КОТЕЛЬНОЙ, НОРМЫ КАЧЕСТВА ПИТАТЕЛЬНОЙ, ПОДПИТОЧНОЙ, СЕТЕВОЙ, КОТЛОВОЙ ВОДЫ И КОНДЕНСАТА НА ПРИМЕРЕ ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ ГОРОДА ГОМЕЛЯ

Цель работы: ознакомление с нормами качества воды, используемой при работе в котельной и на ТЭЦ.

Общие сведения

Водный режим котельной должен вестись так, чтобы исключить повреждения тепломеханического оборудования, питательных трубопроводов и трубопроводов тепловых сетей вследствие отложений накипи, шлама и коррозии.

Качество питательной, подпиточной, сетевой воды должно соответствовать требованиям «Правил технической эксплуатации электростанций и сетей» и «Правил устройства и безопасной эксплуатации паровых и водогрейных котлов».

Для того, чтобы воднохимический режим соответствовал действующим Правилам, в котельной проводится:

- 1) докотловая обработка воды, которая включает в себя умягчение, снижение щелочности и термическую деаэрацию;
- 2) внутрикотловая обработка воды, которая состоит из фосфатирования и амминирования;
- 3) регулирование качества котловой воды путем продувок;
- 4) консервация оборудования – защита от «стояночной коррозии» во время вывода котлов в резерв или на длительный останов.

Характеристика основного тепломеханического оборудования

В котельной установлены:

1. Водогрейный котел ПТВМ-100, стац. № 1, теплопроизводительностью – 92 Гкал/ч, расход воды – 2140 т/ч.
2. Паровой котел БКЗ-50-39, стац. № 2, вертикально-водотрубный, производительностью по пару т/ч, давление пара – 4,0 МПа, температура перегретого пара – 450 °С. Система испарения котла – двухступенчатая.
3. Паровой котел «Шихау», стац. № 4, вертикально-водотрубный, двухбарабанный, давление пара 2,2 МПа, температура перегре-

того пара – 375 °С, паропроизводительность – 70 т/ч. Система испарения котла – одноступенчатая.

4. РОУ (редуционно-охладительное устройство), стац. № 1–4, давление редуцированного пара – 0,5 МПа.

5. Подогреватели сетевой воды – бойлера пиковые, стац. № 1–6, тип ПСВ-200-7-15. Давление в корпусе – 0,6 МПа, в трубной системе – 1,4 МПа, температура воды на выходе – 150 °С.

6. Бойлер подпитки теплосети, стац. № 4, тип 200-7-15, расход воды 400 м³/ч, температура воды на выходе – 150 °С.

7. Деаэраторы, стац. № 1–3, тип ДСА-100-атмосферный, производительностью 100 т/ч, емкость бака-аккумулятора – 50 м³.

8. Насосы: сетевые, стац. № 1–6, конденсатные, стац. № 1–4, питательные, стац. № 1–6, циркуляционные, стац. № 1–3, насосы технической воды, стац. № 1–4.

Схема точек химконтроля водного режима

Для обеспечения контроля за водным режимом котлоагрегатов, бойлеров, деаэраторов имеются следующие точки отбора проб:

Котел № 1 ПТВМ-100 – прямая сетевая вода. Пробоотборник установлен на котле.

Котел № 2 – котловая вода из барабана котла (чистый отсек) БКЗ-50-39.

Котел № 3 – котловая вода из линии непрерывной продувки выносных циклонов (солевой отсек). Пробоотборник установлен на котле.

Котел № 4 «Шихау» – котловая вода из барабана котла. Пробоотборник установлен на котле.

Деаэраторы № 1 и 2 – питательная вода. Пробоотборник установлен в химцехе.

Деаэратор № 3 – подпиточная вода. Пробоотборник установлен в подвале химцеха.

Бойлера № 1–6 – конденсат бойлеров. Пробоотборные точки установлены в подвале машинного зала у каждого бойлера.

Обратная сетевая вода – пробоотборник установлен в подвале машинного зала.

Нормы качества питательной, подпиточной, сетевой, котловой воды и конденсата

Согласно «ПТЭ электростанций и сетей» качество питательной воды для котлов с естественной циркуляцией и давлением (4,0 МПа), подпиточной воды тепловых сетей, конденсата и сетевой воды должно соответствовать следующим нормам (табл. 1):

Таблица 1

Наименование вод	Жесткость, мкг-экв/л	Железо, мкг/л	Медь, мкг/л	Кислород, мкг/л	Нефть, мг/л	рН	Ик	Щелочность общая, мг-э/л	Аммиак, мг/л
не более									
Питательная	5/10	50/100	10	20	0,5	8,5–9,5	–0	1,0	1,5
Подпиточная	–	–	–	50	1,0	8,3–9,5	3,0 1,8 1,2	0	–
Сетевая	–	500	–	20	1,0	8,3–9,5	3,2 2,0 1,5	0	0,1–0,2
Конденсат	5/10	100	20	20	0,5	8,5–9,5	0	–	1,0

Нормы качества котловой воды и режим ее коррекционной обработки установлены согласно п.п. 4.8.23–4.8.27 «ПТЭ электростанций и сетей» и должны соответствовать следующим показателям (табл. 2):

Таблица 2

Наименование показателей	Котел № 2	Котел № 4
Котловой воды: – чистый отсек – солевой отсек	9,3 не более 11,8	9,3
Избыток фосфатов, мг/л – чистый отсек – солевой отсек	2–6 не более 30 (на жидком топливе) не более 50 (природный газ)	2–15
Относительная щелочность	для котлов со сварными барабанами и приваренными трубами не нормируется	
Непрерывная продувка	0,5–0,3 %	0,5–0,3 %

Докотловая обработка воды

Докотловая обработка воды производится на водоподготовительной установке (ВПУ) производительностью 100 т/ч с целью подготовки добавочной химочищенной воды для питания паровых котлов и химочищенной воды для подпитки тепловых сетей. Основной составляющей питательной воды является конденсат бойлеров, который вместе с добавочной химочищенной водой проходит дегазацию (деаэрацию) в деаэраторах атмосферного типа № 1 и 2. Подпиточная вода деаэрируется в деаэраторе № 3.

Химочищенная вода для питания паровых котлов готовится по схеме Na-Cl – ионирования на ВПУ производительностью 20 т/ч. Na-Cl – ионирование – это метод ионного обмена. По этому методу вода фильтруется через слой катионита, меняя при этом катионы жесткости (Ca^{2+} и Mg^{2+}) на катионы Na^+ , которым насыщен катионит. Затем вода фильтруется через слой анионита, меняя при этом анионы слабых кислот на анион Cl^- , которым насыщен анионит. В итоге получаем умягченную воду с уменьшенной щелочностью.

Жесткость воды – это суммарное содержание в ней катионов-накип-образователей Ca^{2+} и Mg^{2+} , выраженное в мг-экв/л или мкг-экв/л (1 мг-экв/л = 1000 мкг-экв/л). Жесткость бывает карбонатная $\text{Mg}(\text{HCO}_3)$, $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ и некарбонатная CaSO_4 ; MgCl .

$$J_{\text{общая}} = J_{\text{карбон}} + J_{\text{некарб}}$$

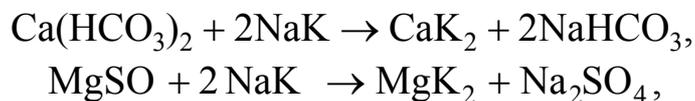
Жесткость также делится на временную (это часть карбонатной жесткости, которая удаляется кипячением) и постоянную.

Щелочность – это суммарное содержание в воде гидроксильных ионов (OH^-) и анионов слабых кислот (HCO_3^- , CO_3^{2-} , PO_4^{3-} и др.), выраженное в мг-экв/л или мкг-экв/л. Щелочность, обусловленная ионами (OH^-), называется гидратной. Она дает окраску по фенолфталеину.

Катионит и анионит – это материалы, способные к реакциям обмена ионами. Их общее название – иониты. Иониты бывают природные (сульфоуголь) и синтетические смолы (катионит КУ-2-8), анионит АВ-17. Основной характеристикой ионитов является их обменная емкость. Она характеризуется количеством поглощенных ионов с начала процесса обмена до появления «проскоков» жесткости или щелочности в воде. Выражается обменная емкость в мг-экв/м³ ионита.

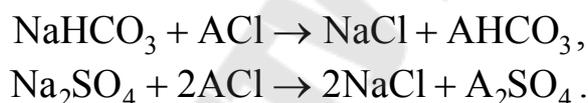
Полная обменная емкость катионита КУ-2-8 по заводской технологической характеристике 1700 г-экв/м³ ионит П, сульфуголя КУ-2-8 по заводской технологической характеристике 500 г-экв/м³ ионит П.

Умягчение воды – это удаление из нее солей жесткости. При умягчении происходят следующие процессы (реакции):



где *K* – условное обозначение катионов. Соли Na, которые образовались в результате реакции, не образуют накипи в котлах.

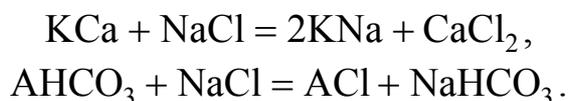
Вода, умягченная на Na-катионитовом фильтре, имеет такую же щелочность, как и исходная вода. Для снижения щелочности воду подают на анионитовые фильтры смешанного действия (ФСД), в которых одновременно происходит анионирование воды и ее умягчение по II ступени Na-катионирования. Фильтры ФСД загружаются одновременно катионитом и анионитом. В процессе анионирования идут следующие реакции обмена:



Вторая ступень Na-катионирования позволяет уменьшить остаточную жесткость воды до уровня 5 мкг-экв/л. Для наиболее полного удаления катионов жесткости из воды в схему ВПУ предусмотрен также Na-катионитовый фильтр III ступени.

В процессе умягчения воды и снижения ее щелочности ионообменные материалы насыщаются катионами Ca²⁺ и Mg²⁺, а также Cl⁻. При полном насыщении ионитов происходит «срабатывание» фильтров. Это значит, что в фильтруемой воде появляется повышенная жесткость и щелочность. Следовательно, фильтр необходимо вывести на регенерацию.

Регенерация – это процесс восстановления обменной емкости ионита. Регенерация катионита и анионита при обработке воды по схеме Na-Cl-ионирования осуществляется 8%-ым раствором поваренной соли (NaCl). При этом идут следующие реакции обмена:



Вода для подпитки теплосети готовится на ВПУ производительностью 80 т/ч умягченной воды по схеме I-ступенчатого Na-катионирования. Качество подпиточной воды должно соответствовать «Нормам качества подпиточной воды» согласно «ПТЭ». Одним из основных показателей качества является Ик – карбонатный индекс.

Карбонатный индекс – это произведение жесткости воды, выраженной в мг-экв/л на щелочность воды, выраженную в мг-экв/л. Нормативное значение карбонатного индекса зависит от температуры сетевой воды. Чем выше температура в сети, тем меньше должна быть жесткость подпиточной воды, а, следовательно, ниже карбонатный индекс.

Карбонатный индекс для тепловых сетей: $\text{мкг} = 0,001 \text{ м}^2$ (подпитка).

Жесткость в подпитке: $15 \text{ мкг/л} = 0,015 \text{ мг/л}$.

Щелочность общая: $2,1 \text{ мг/л}$.

$$\text{Ик} = 0,015 \cdot 2,1 = 0,0315 (\text{мг-экв/л})^2.$$

Карбонатный индекс сетевой воды:

– жесткость = 200 мкг/л ;

– щелочность = 2 мг/л .

$$\text{Ик} = 0,2 \cdot 2 = 0,4 (\text{мг-экв/л})^2.$$

Норма – $3,0 \rightarrow$ отлично.

Термическая деаэрация воды или ее полная дегазация проводится для того, чтобы удалить растворенные в воде газы – кислород (O_2) и уголекислоту (CO_2).

Умягченная на водоподготовительной установке вода содержит в себе столько растворенных газов, сколько их было в исходной воде, газы попадают за счет контакта с окружающей средой. Растворенные в воде кислород и уголекислота способствуют развитию коррозии поверхностей нагрева котлов, теплообменников и трубопроводов.

Коррозия – это разрушение металлов под действием растворов или окружающей среды за счет протекания электрохимических процессов.

К факторам, обуславливающим коррозию, относятся:

- 1) неоднородная структура металла;
- 2) тесный контакт металла с раствором или водой;

3) наличие в воде агрессивных примесей: кислорода, кислот, щелочей и др.

В зависимости от вида агрессивных примесей в воде коррозия бывает:

- кислородная (язвы, ржавчина на металле);
- углекислотная (сквозные свищи или равномерное истончение металла);
- сернокислотная, нитритная (язвы на металле);
- межкристаллитная (щелочная хрупкость металлов – трещины).

Удаление из воды растворенных газов методом термической деаэрации воды основано на законе Генри, согласно которому при повышении температуры уменьшается парциальное давление газа над водой и растворимость этого газа падает. Для полного удаления газов необходимо, чтобы парциальные давления газов над водой были равны 0. Это возможно в том случае, если вода будет кипеть при избыточном давлении. Поэтому в деаэраторе необходимо создать давление 0,02 МПа, которому соответствует температура кипения воды 102–104 °С. При таком режиме сначала удаляются растворенные в воде кислород и свободная CO_2 , а затем начинается процесс разложения бикарбоната натрия (NaHCO_3) с выделением CO_2 . Следовательно, для наиболее полной дегазации воды необходимо постоянно отводить выделяющиеся из нее газы.

Для деаэрации воды в котельной установлены деаэраторы атмосферного типа ДСА-100. Деаэратор состоит из аккумуляторного бака и деаэрационной колонки. В баке собирается продеаэрированная вода, которая является питательной (из деаэраторов № 1 и 2) или подпиточной (деаэратора № 3).

В колонке расположены дырчатые тарелки, через отверстия которых вниз стекают потоки воды, а навстречу подается греющий пар. Дырчатые тарелки обеспечивают большую площадь соприкосновения воды с паром. Выделяющиеся растворенные газы и часть несконденсировавшегося пара поступают в охладитель выпара, где пары конденсируются, а газы удаляются в атмосферу.

Деаэратор снабжен предохранительным устройством. Это гидрозатвор, который срабатывает при повышении давления в деаэраторе

до 0,05 МПа. При нормальной деаэрации воды оптимальной величиной выпара считается 2–3 кг пара на 1 тонну воды.

Деаэрационная установка работает без сбоев, если соблюдаются следующие условия:

1) температура деаэрационной воды должна быть равна температуре насыщения, соответствующей данному давлению в деаэраторе ($P = 0,12 \text{ МПа} = 102\text{--}104 \text{ }^\circ\text{C}$);

2) деаэрируемая вода должна тонко разбрызгиваться;

3) потоки воды должны поступать непрерывно, по тарелкам распределяться равномерно;

4) отвод удаляемых газов должен быть непрерывным.

Внутрикотловая обработка воды

Внутрикотловая обработка воды является методом коррекционного улучшения ее качества путем непосредственного ввода реагентов в барабан котла. В котельной проводится фосфатирование и амминирование котловой воды котлов № 2 и 4.

Фосфатирование котловой воды применяется для удаления из питательной воды остаточной кальциевой жесткости. Согласно «ПТЭ электростанций и сетей» фосфатирование обязательно для паровых котлов с давлением более 16 кг/мг остаточной жесткостью питательной воды более 1 мкг-экв/л.

Все существующие способы химводоподготовки не дают возможности получить питательную воду с нулевой жесткостью. Но даже самая маленькая остаточная жесткость в котлах большой производительности и высокого давления достаточна для образования накипи.

Накипь – это слой различных отложений, откладывающийся на поверхности нагрева котлов и теплообменников в результате воздействия на них примесей. Накипи по своему составу бывают:

1) кальциевые и магниевые;

2) медные;

3) железные;

4) алюминиевые.

Все они могут быть карбонатными (HCO_3), сульфатными (SO_4^{-2}), силикатными (SiO_4^{-2}), фосфатными и др.

Накипь ухудшает теплопередачи, вызывает перегрев металла, уменьшает сечение труб для прохода воды и ухудшает технико-экономические показатели котельной установки.

Введение в воду тринатрийфосфата $\text{Na}_3\text{PO}_4\text{H}_2\text{O}$ позволяет связать катион Ca^{+2} в соль кальция $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$, которая обладает свойством не прикипать к поверхности нагрева, а образовывать шлам, который можно сравнительно легко удалить из котла периодической продувкой. Кроме того, установлено, что добавка фосфатов задерживает процесс уже начинавшейся коррозии.

Процесс фосфатирования должен проводиться в соответствии с «Инструкцией по фосфатированию воды в Центральной котельной».

Аммиачная обработка питательной воды (амминирование) применяется с целью наиболее полного связывания свободной углекислоты, растворенной в воде, а также для увеличения рН питательной воды выше 9,1, что необходимо для подавления углекислотной коррозии.

Амминирование основано на способности аммиака вступать в реакцию с углекислотой:



Небольшой избыток аммиака повышает рН до требуемого значения. Аммиак (NH_3) – летучее вещество, поэтому несмотря на то, что его вводят в фосфатный бак, он быстро распространяется по всему пароводяному тракту. В котле аммиак переходит в пар, а при конденсации в бойлерах он вновь растворяется, повышая рН конденсата. Если в конденсате есть углекислота, то она связывается с аммиаком и конденсат приобретает щелочную реакцию (окрашивается фенолфталеином в розовый цвет). Далее с конденсатом аммиак попадает в питательную воду. В результате потерь с испарениями в бойлерах-деаэраторах часть аммиака из системы удаляется. Восполнения потерь производится непрерывно путем подачи аммиака насосами.

Контрольные вопросы

1. Водный режим котельной.
2. Характеристика основного тепломеханического оборудования.
3. Схема точек химконтроля водного режима.
4. Нормы качества питательной, подпиточной, сетевой, котловой воды и конденсата.
5. Докотловая обработка воды.

Лабораторная работа № 5

НОРМИРОВАНИЕ КАЧЕСТВА СТОЧНЫХ ВОД КОТЕЛЬНОЙ

Цель работы: освоение лабораторных методик нормирования качества сточных вод котельных и ТЭЦ.

Общие сведения

Необходимо отметить, что развитие производственных процессов происходило практически без ограничений в потреблении водных ресурсов, что привело к критическим ситуациям с водопотреблением во многих регионах республики, особенно в крупных промышленных центрах. Нарастающие масштабы водопотребления повлекли за собой значительный рост объемов промышленных сточных вод, что привело к ухудшению экологической обстановки.

Несмотря на имеющийся научно-технический потенциал и возрастающие капитальные вложения в очистку сточных вод и водоохраные мероприятия, снижение загрязнения природной среды не отмечается. Уровень водоочистки промоток пока еще не является достаточным, поскольку имеющиеся очистные сооружения в значительной степени не способны эффективно выполнять свои функции. Продолжающийся сброс промоток обусловлен тем, что отраслевые министерства практически не несли ответственность за решение проблемы охраны среды и при создании водоочистных и водоохраных объектов руководствовались остаточным принципом выделения ресурсов. Это обусловило крайне длительные сроки внедрения новых и перспективных разработок в практику, отсутствие серийного изготовления водоочистного оборудования, производства контрольно-измерительных приборов.

Одновременно с усиливающимся загрязнением водных объектов при сборе промышленных сточных вод происходит безвозвратная потеря больших количеств ценных компонентов, которые могут быть использованы в повторных циклах в народном хозяйстве. Необходимо отметить также, что возрастающее загрязнение водных источников вызовет необходимость дополнительной дорогостоящей очистки воды для последующего ее применения в ряде отраслей промышленности, коммунальном и сельском хозяйстве, что также потребует больших капитальных затрат.

В связи с переходом на новые условия хозяйствования промышленные предприятия должны осваивать высокоэффективные, ресурсосберегающие технологии охраны окружающей среды и очистки сточных вод, что может быть обеспечено внедрением перспективных, экологически чистых технологий и аппаратов водоочистки. Перспективным с экономической и социально-экологической точек зрения направлением решения проблемы эффективной очистки сточных вод представляется совершенствование технологических процессов с целью уменьшения их водоемкости и количества образующихся отходов, поэтапное сокращение объемов сбора сточных вод за счет оборотного и повторно-последовательного их использования и, в конечном итоге, создание замкнутых систем водного хозяйства промышленных предприятий и промузлов. Процесс водопользования в таких системах должен рассматриваться как замкнутый водоресурсный цикл с минимальным эффектом ее использования без ущерба окружающей природной среде и рациональным использованием ценных компонентов в виде товарных продуктов и вторичного сырья. При этом на начальном этапе приоритетным направлением становится создание локальных систем переработки отдельных потоков сточных вод с применением как традиционных, так и новых перспективных технологий.

Перспективные технологии

1. *Механическая очистка* (предварительный этап: гравитационное отстаивание – биокоагуляция, осветление во взвешенном слое). Более полное осветление – фильтрованием (через слой зернистых материалов).

2. *Физико-химические методы очистки сточных вод*: коагуляция (сорбционные извлечения ценных компонентов с их последующей утилизацией), флотация, ионный обмен (извлечение тяжелых и цветных материалов и их утилизация), мембранные технологии: обратный осмос, ультрафильтрация (мембранный процесс разделения растворов, осмотическое давление которых мало).

3. *Биологическая очистка сточных вод*: аэробный метод лучший (особенно двухступенчатый) + озонирование (чистым кислородом).

Оборудование: «Didiez Wezre, Schumaebuz...» Σ 13 фирм (Германия, Финляндия, Швейцария («Ustez»), Франция, Дания).

Порядок выполнения работы

1. Определение концентрации взвешенных частиц гравиметрическим методом

Метод измерения массовой концентрации взвешенных веществ заключается в фильтровании проб сточных вод через бумажный или мембранный фильтры, высушивании отфильтрованных частиц в течение двух часов (в случае бумажного фильтра) или одного часа (для мембранного фильтра) при температуре $t = 105 \pm 2$ °С и взвешивании высушенного осадка. Привес высушенных взвешенных частиц должен находиться в пределах 10–250 мг. Продолжительность двух определений:

- при фильтровании через бумажный фильтр – 8 часов;
- при фильтровании через мембранный фильтр – 5,5 часов.

Средства измерений, вспомогательные устройства, реактивы и материалы:

- весы лабораторные класс точности 1.2;
- сушильный шкаф с терморегулятором и термометром до 200 °С;
- эксикатор;
- колба Бунзена и воронка Бюхнера;
- воронка Зейтца или прибор Олихова;
- фильтры бумажные обеззоленные «белая лента» или «синяя лента» с диаметром 9 или 11 см;
- фильтры мембранные № 5 или 6 («предварительные») с диаметром пор от 1,2 до 5 мкм;
- бюксы стеклянные;
- воронки стеклянные;
- насос водоструйный лабораторный (или любой другой насос, создающий необходимое разряжение);
- цилиндры мерные на 50, 100, 500, 750, 1000 и 2000 см³;
- стаканы термостойкие;
- вода дистиллированная;
- кальций хлористый плавленый или кальций хлористый гранулированный.

Выполнение измерений

Вставляют фильтр в стеклянную воронку или воронку Бюхнера и промывают его дистиллированной водой (~ 200 см³). Промытый фильтр помещают в пронумерованный бюкс и высушивают в сушильном шкафу при температуре 105 ± 2 °С в течение двух часов. Закрывают бюкс крышкой и переносят его в эксикатор для охлаждения в течение 30 мин, после чего его взвешивают.

Фильтры по одному помещают в стакан на 200 см³, наполненный на 2/3 объема дистиллированной водой, нагретой до 80 °С, медленно доводят ее при слабом нагревании до кипения. Воду сливают, фильтры заливают новой порцией воды, доводят до кипения и кипятят 5–10 мин. Эту операцию повторяют дважды для полного удаления пузырьков воздуха из пор фильтра. Затем фильтр помещают в пронумерованный бюкс, подсушивают сначала при комнатной температуре на воздухе, затем выдерживают в сушильном шкафу при температуре 105 ± 2 °С в течение 1 ч.

Переносят закрытый крышкой бюкс с фильтром в эксикатор; охлаждение до комнатной температуры допускается ~ за 30 мин, после чего фильтр в бюксе взвешивают с погрешностью 0,0002 г. Для проверки постоянства массы фильтр повторно высушивают в сушильном шкафу в течение 30 мин.

Разница в массе не должна превышать 0,0002 г.

Обработка результатов

Содержание взвешенных веществ (С) мг/дм³ находят по формуле

$$C = \frac{(m_1 - m_2)}{V} \cdot 1000,$$

где m_1 – масса бюкса с фильтром и осадком, мг; m_2 – масса бюкса с чистым фильтром, мг; V – объем анализируемой воды, см³.

2. Определение концентрации железа методом с о-фенантролином

Метод основан на взаимодействии ионов двухвалентного железа с 1,10-фенантролином с образованием красного комплекса с максимумом поглощения λ 510 нм. Восстановление железа (III) до (II) проводится гидроксиламином. Окраска комплекса не зависит от рН в пределах от 3 до 9 и устойчива длительное время.

Прямопропорциональная зависимость между светопоглощением и концентрацией железа сохраняется в пределах 0,05–2,0 мг/дм³.

Fe (II) при анализе из 50 см³ пробы с использованием кюветы 10 или 50 мм. Коэффициент молярного поглощения комплекса ε $11 \cdot 10^3$.

Средства измерений, реактивы и материалы:

- спектрофотометр или фотоэлектроколориметр, позволяющий измерить оптическую плотность при λ 510 нм, кюветы с толщиной слоя 1–5 см;
- плитка электрическая;
- посуда мерная лабораторная стеклянная 2-го класса точности, колбы мерные вместимостью 50 и 100 см³;
- колбы плоскодонные вместимостью 250 см³;
- пипетки мерные с делением 0,1–0,01 см³ вместимостью 1, 2, 5 и 10 см³ 2-го класса точности.

Реактивы:

- аммоний уксуснокислый;
- гидроксилламин солянокислый;
- отраслевой стандартный образец железа ОСО-009-89 или квасцы железоаммонийные;
- кислота соляная;
- кислота уксусная;
- кислота азотная;
- 1,10-фенантролин или моногидрат (ортофенантролин) C₁₂H₈N₂ × H₂O МРТУ или 1,10-фенантролин гидрохлорид;
- вода дистиллированная;
- аммиак водный.

Выполнение измерений

Спектрофотометр или фотоэлектроколориметр, позволяющий измерить оптическую плотность при λ 510 нм, прогревают в течение 15 минут перед началом выполнения измерений.

Приготовление раствора о-фенантролина: 0,280 г моногидрата о-фенантролина (C₁₂H₈N₂ × H₂O), взвешенного с погрешностью не более 0,01 г, помещают в мерную колбу вместимостью 100 см³, рас-

творяют в дистиллированной воде и доводят до метки. Раствор следует хранить в темной склянке на холоде.

Приготовление 10%-го раствора солянокислого гидроксилamina: 10 г солянокислого гидроксилamina ($\text{NH}_2\text{OH} \times \text{HCl}$), взвешенного с погрешностью не более 0,1 г, растворяют в дистиллированной воде и доводят объем до 100 см^3 .

Приготовление буферного раствора: 250 г уксуснокислого аммония ($\text{NH}_4\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2$), взвешенного с погрешностью не более 0,1 г, растворяют в 150 см^3 дистиллированной воды. Добавляют 700 см^3 уксусной кислоты и доводят объем до 1 дм^3 дистиллированной водой.

Приготовление основного стандартного раствора железа из отраслевого стандартного образца с аттестованным содержанием железа 1 мг/см^3 помещают в мерную колбу вместимостью 50 см^3 и разбавляют до метки 1 М раствором азотной кислоты, 1 см^3 раствора содержит 0,1 мг железа.

Приготовление рабочего стандартного раствора: рабочий раствор готовят в день проведения анализа разбавлением основного раствора в десять раз, 1 см^3 раствора содержит 0,010 мг железа.

Приготовление основного стандартного раствора соли железа: 0,8634 г железоаммонийных квасцов $\text{FeNH}_4(\text{SO}_4)_2 \times 12\text{H}_2\text{O}$ растворяют в дистиллированной воде, прибавляют 2 см^3 соляной кислоты плотностью $1,19 \text{ г/см}^3$ и разбавляют до 1 дм^3 дистиллированной водой, 1 см^3 раствора содержит 0,1 мг железа.

Приготовление рабочего стандартного раствора соли железа: рабочий раствор готовят в день проведения анализа разбавлением основного раствора в 10 раз, 1 см^3 раствора содержит 0,010 мг железа.

Приготовление гидрохлорида ортофенантролина, 0,1%-й раствор: 0,1 г гидрохлорида ортофенантролина, взвешенного с точностью до 0,01 г, растворяют в 100 см^3 дистиллированной воды. Реактив сохраняют в темной склянке с притертой пробкой на холоде.

Выполнение измерений

В стаканчики из термостойкого стекла емкостью $\sim 150 \text{ см}^3$ помещают 0,00; 0,10; 0,50; 1,00; 2,00; 5,00; 7,50; $10,00 \text{ см}^3$ рабочего стандартного раствора железа, добавляют дистиллированной воды до $\sim 40 \text{ см}^3$, добавляют 1 см^3 10%-го раствора гидроксилamina, доводят рН раствора \sim до 2 (по универсальной индикаторной бумаге), добавляя по каплям HCl концентрата, и кипятят растворы до уменьшения объема

~ на 1/3. После охлаждения количественно переводят растворы в мерные колбы на 50 см³, прибавляют по 2 см³ раствора 1,10-фенантролина, 10 см³ ацетатного аммонийного буфера, доводят до метки дистиллированной водой, перемешивают и через 10–15 мин измеряют светопоглощение при λ 510 нм или со светофильтром X 490 ± 10 в кюветах 10 или 50 мм против холостого раствора на дистиллированной воде со всеми реактивами. Градуировочный график строят в координатах: светопоглощение – мг/дм³ (холостой раствор обычно бывает слегка окрашенным, т. к. даже очень чистые реактивы часто содержат примесь железа).

Обработка результатов

Содержание железа (X) в мг/дм³ рассчитывают по формуле

$$X = \frac{C \cdot 50}{V},$$

где C – концентрация железа, найденная по градуировочному графику, мг/дм³; V – объем пробы, см³.

3. Определение концентрации хлорид-иона титриметрическим методом с солями ртути

Метод основан на взаимодействии хлоридов с ионами ртути (II) с образованием малодиссоциированного соединения



После окончания титрования избыток ртути образует с индикатором дифенилкарбазоном в кислой среде (рН 2,5 ± 0,2) окрашенное в фиолетовый цвет комплексное соединение, что является сигналом к прекращению титрования.

Резкость перехода окраски индикатора в значительной мере зависит от соблюдения правильного значения рН раствора. При рН 2,0 и ниже окраска не появляется, при рН 3,0 появление окраски запаздывает. Точное установление рН предусмотрено в ходе определения использованием смешанного индикатора.

Средства измерений, вспомогательные устройства, реактивы и материалы

- весы лабораторные;
- сушильный шкаф электрический общелабораторного назначения;
- плитка электрическая;
- колбы мерные вместимостью 100, 1000 см³;
- пипетки с делением вместимостью 1, 2, 5, 10, 25 см³ 2-го класса;
- бюретки лабораторные стеклянные 2-го класса точности вместимостью 10, 25, 50 см³;
- воронки лабораторные;
- склянки из темного стекла вместимостью 100 см³ для хранения реактивов;
- штатив металлический;
- фильтровальная бумага;
- ртуть (II) азотнокислая;
- натрия гидроокись;
- натрий хлористый;
- кислота азотная;
- вода дистиллированная;
- перекись водорода;
- спирт этиловый ректифицированный технический;
- дифенилкарбозон;
- бромфеноловый синий;
- бумага индикаторная универсальная.

Выполнение измерений

Отмеряют мерным цилиндром 100 см³ профильтрованной пробы, переносят в колбу для титрования, добавляют 0,3 см³ смешанного индикатора. Если анализируемый раствор окрашивается в желтый цвет, то добавляют по каплям 0,1 М раствор NaOH до перехода желтой окраски в синюю, затем вводят по каплям 0,2 М раствор HNO₃ до желтого окрашивания, дополнительно приливают 1 см³ 0,2 М HNO₃ и титруют раствором Hg(NO₃)₂ до фиолетового окрашивания.

Если после добавления смешанного индикатора анализируемая проба окрашивается в синий цвет, то, исключив добавление 0,1 М NaOH, вводят по каплям 0,2 М HNO₃ и далее, как указано выше.

Вычисление результатов

Расчет концентрации $\text{Hg}(\text{NO}_3)_2$:

$$M = \frac{0,05 \cdot 10}{V} = \frac{0,5}{V},$$

где M – молярность раствора $\text{Hg}(\text{NO}_3)_2$; V – значение объема раствора $\text{Hg}(\text{NO}_3)_2$, израсходованного на титрование 10 см^3 $0,05 \text{ М}$ раствора NaCl , см^3 .

Расчет концентрации хлоридов в анализируемой воде:

$$C = \frac{(V_{\text{п}} - V_0) \cdot M \cdot 35,45 \cdot 1000}{V},$$

где C – концентрация хлоридов в анализируемой воде, мг/дм^3 ; $V_{\text{п}}$ – значение объема раствора $\text{Hg}(\text{NO}_3)_2$, израсходованного на титрование пробы, см^3 ; V_0 – значение объема раствора $\text{Hg}(\text{NO}_3)_2$, израсходованного на титрование, см^3 ; M – молярность раствора $\text{Hg}(\text{NO}_3)_2$; V – объем анализируемой пробы, взятый для измерения, см^3 .

Контрольные вопросы

1. Механические способы очистки сточных вод.
2. Физико-химические способы очистки сточных вод.
3. Биологические способы очистки сточных вод.
4. Приборы, оборудование и используемые лабораторные методы при исследовании сточных вод.

ЛИТЕРАТУРА

1. Родионов, А. И. Техника защиты окружающей среды : учеб. для вузов / А. И. Родионов, В. Н. Клушин, Н. С. Торогешников. – Москва : Химия, 1980. – 512 с.

2. Белов, В. Г. Охрана окружающей среды : учеб. для техн. специальностей вузов / В. Г. Белов. – Москва : Высш. шк., 1991. – 319 с.

3. Биргер, М. И. Справочник по пыле- и золоулавливанию / М. И. Биргер. – Москва : Энергоатомиздат, 1983. – 312 с.

4. Равич, М. Б. Эффективность использования топлива / М. Б. Равич. – Москва : Наука, 1977. – 344 с.

5. Бретшнайдер, Б. Охрана воздушного бассейна от загрязнения. Технология и контроль / Б. Бретшнайдер ; пер. с англ. – Ленинград : Химия, 1988. – 288 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

**Требования к составу производственных сточных вод,
поступающих в городскую канализационную сеть.**

**Кратность повышенного тарифа в зависимости
от концентраций загрязняющих веществ**

Наименование веществ	Единица измерения	Предельно-допустимая концентрация вещества (ПДК)	Кратность тарифа в зависимости от концентрации загрязнений сверх ПДК
<i>по г. Гомелю</i>			
рН	–	6,5–8,5	от 5,0 до 6,5 – 2 от 9,5 до 8,5 – 2 ниже 5,0 – 3 выше 9,5 – 3
Нефтепродукты	мг/л	1,0	от 1,0 до 10,0 – 2 выше 10,0 – 3
Взвешенные вещества	-//-	250,0	от 250,0 до 500,0 – 2 выше 500,0 – 3
БПК ₅	мгО ₂ /л	225,0	от 225,0 до 500,0 – 2 до 500,0 – 3
БПК ₅ для пищевых и деревообраба- тывающих предприятий	-//-	800,0	от 800,0 до 1000,0 – 2 выше 1000,0 – 3
ХПК	-//-	560,0	от 560,0 до 800,0 – 2 выше 800,0 – 3
ХПК для пищевых и деревообраба- тывающих предприятий	-//-	2000,0	от 2000,0 до 3000,0 – 2 выше 3000,0 – 3
Медь	мг/л	0,5	выше 0,5 – 2
Цинк	-//-	1,0	выше 1,0 – 2
Никель	-//-	0,025	выше 0,025 – 2
Кадмий	-//-	0,1	выше 0,1 – 2
Кобальт	-//-	1,0	более 1,0 – 2
Алюминий	-//-	0,5	более 0,5 – 2

Окончание

Наименование веществ	Единица измерения	Предельно-допустимая концентрация вещества (ПДК)	Кратность тарифа в зависимости от концентрации загрязнений сверх ПДК
Хром (общий)	-//-	0,07	более 0,07 – 2
Фтор (фториды)	мг/л	1,0	от 1,0 до 5,0 – 2 более 5,0 – 3
Фенолы	-//-	0,01	от 0,01 до 0,1 – 2 более 0,1 – 3
Олово	-//-	10,0	более 10,0 – 2
Железо (общее)	-//-	5,0	более 5,0 – 2
Мышьяк	-//-	отсутствие	при наличии – 2
Ртуть	-//-	отсутствие	при наличии – 2
Цианиды	-//-	отсутствие	при наличии – 2
СПАВ биологически жесткие	-//-	отсутствие	при наличии – 2
СПАВ биологически мягкие	-//-	4,6	более 4,6 – 2
Азот аммонийный	-//-	18,0	более 18,0 – 2
Сульфаты	-//-	450,0	более 450,0 – 2
Хлориды	-//-	540,0	более 540,0 – 2
Жиры	-//-	50,0	более 50,0 – 2
Свинец	-//-	0,1	более 0,1 – 2
<i>По остальным городам Гомельской области</i>			
рН	–	6,5–8,5	от 5,0 до 6,5 – 2 от 9,5 до 8,5 – 2 ниже 5,0 – 3 выше 9,5 – 3
БПК ₅	мгО ₂ /л	500,0	от 500,0 до 1000,0 – 2 выше 1000,0 – 3
Взвешенные вещества	мг/л	500,0	от 500,0 до 1000,0 – 2 выше 1000,0 – 3
Нефтепродукты	-//-	25,0	от 25,0 до 50,0 – 2 выше 50,0 – 3

СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа № 1. Определение содержания твердых частиц, оксидов ванадия и золы в дымовых газах теплоэнергоустановок	3
Лабораторная работа № 2. Определение содержания сернистых соединений в дымовых газах теплоэнергоустановок.....	9
Лабораторная работа № 3. Определение содержания оксидов азота в дымовых газах теплоэнергоустановок.....	14
Лабораторная работа № 4. Водный режим котельной, нормы качества питательной, подпиточной, сетевой, котловой воды и конденсата на примере тепловых сетей города Гомеля.....	20
Лабораторная работа № 5. Нормирование качества сточных вод котельной	29
Литература.....	38
Приложение	39

Учебное электронное издание комбинированного распространения

Учебное издание

Овсянник Наталья Владимировна

ЭКОЛОГИЯ ЭНЕРГЕТИКИ
Лабораторный практикум
по одноименному курсу
для студентов специальности 1-43 01 05
«Промышленная теплоэнергетика»
дневной формы обучения

Редактор *Н. В. Гладкова*

Компьютерная верстка *Н. В. Широглазова*

Подписано в печать 29.01.08.

Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.

Цифровая печать. Усл. печ. л. 2,56. Уч.-изд. л. 2,0.

Изд. № 118.

E-mail: ic@gstu.gomel.by

<http://www.gstu.gomel.by>

Издатель и полиграфическое исполнение:

Издательский центр

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

ЛИ № 02330/0131916 от 30.04.2004 г.

246746, г. Гомель, пр. Октября, 48.

