

**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**

### **ПРАКТИКУМ**

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

**Гомель 2014**

УДК 574(075.8)  
ББК 20.1я73  
О-34

*Рекомендовано научно-методическим советом  
энергетического факультета ГГТУ им. П. О. Сухого  
(протокол № 3 от 26.11.2013 г.)*

Рецензент: канд. техн. наук, доц. каф. «Электроснабжение»  
ГГТУ им. П. О. Сухого *Т. В. Алферова*

- Овсянник, Н. В.**  
О-34 Экология энергетики : практикум по одноим. курсу 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, 2014. – 45 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://library.gstu.by>. – Загл. с титул. экрана.

Данный практикум состоит из семи разделов. По каждой теме, кроме необходимых теоретических сведений, представлены методики расчета, необходимые данные для 25 вариантов и примеры решения задач.

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

УДК 574(075.8)  
ББК 20.1я73

© Учреждение образования «Гомельский  
государственный технический университет  
имени П. О. Сухого», 2014

## **ПРАКТИЧЕСКИЕ РАБОТЫ**

### **Введение**

Данные практические работы по дисциплине «Экология энергетики» предназначены для студентов специальностей: 1– 43 01 05 «Промышленная теплоэнергетика» и 1–43 01 07 «Техническая эксплуатация энергооборудования организаций».

Выполнение практических работ позволит студентам закрепить и углубить знания по дисциплине «Экология энергетики», а также приобрести навыки применения теоретических знаний.

При выполнении практических работ студент должен научиться рассчитывать количество выбросов золы, сажи, оксидов азота, серы, углерода, ознакомиться с методами очистки сточных вод.

## Практическая работа №1

# ВЫБРОСЫ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ ТЕПЛОЭНЕРГОУСТАНОВКАМИ С ДЫМОВЫМИ ГАЗАМИ В АТМОСФЕРУ

### Теоретическая часть

При сжигании твердого и жидкого топлива теплоэнергоустановками в атмосферу с дымовыми газами выбрасываются твердые частицы (летучая зола и несгоревшее топливо), которые оказывают негативное воздействие на окружающую среду и здоровье человека. Количество летучей золы, выбрасываемой в атмосферу энергетическими установками, зависит от топлива и от эффективности очистки газов в золоуловителях, устанавливаемых за котлами.

На выбор золоуловителей влияет ряд факторов: вид топлива и способ его сжигания, физико-химические свойства золы, возможность размещения газоочистного оборудования на реконструируемых ТЭС.

Для очистки дымовых газов от летучей золы применяют золоуловители различных типов:

- аппараты сухой инерционной очистки газов (жалюзийные золоуловители, циклоны, прямоточные циклоны, батарейные циклоны);
- аппараты мокрой очистки газов;
- электрофильтры.

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. 1.1.

Очищаемый от летучей золы газ тангенциально входит в 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 действи-

ем 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.

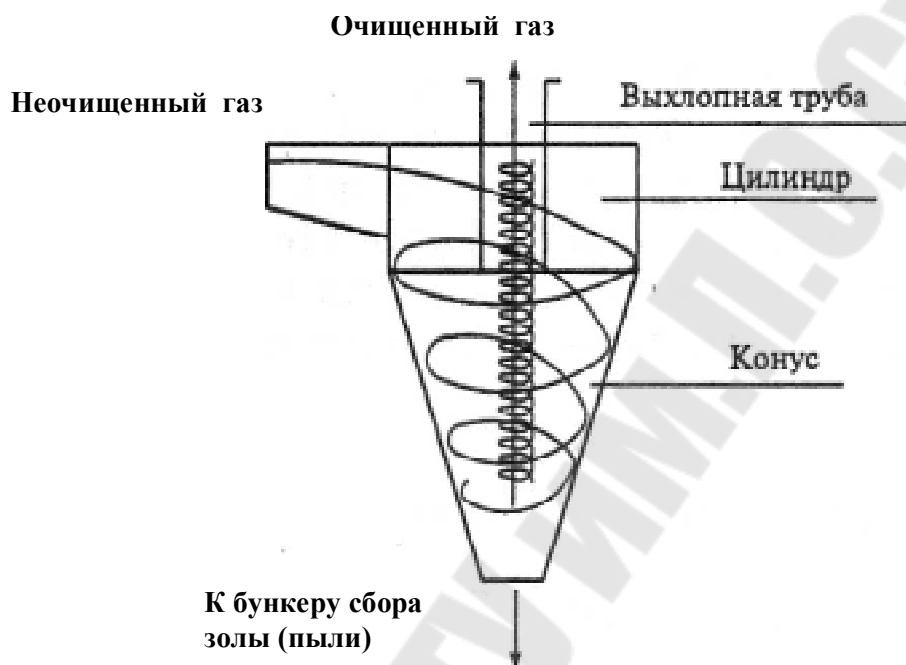


Рис. 1.1. Основные элементы и принцип действия циклонного золоуловителя

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.

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 (рис. 1.2а). Наиболее широкое применение среди аппаратов мокрого золоулавливания нашли золоуловители с трубами (коагуляторами) Вентури (рис. 1.2б).

В них происходит предварительное улавливание газов 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.

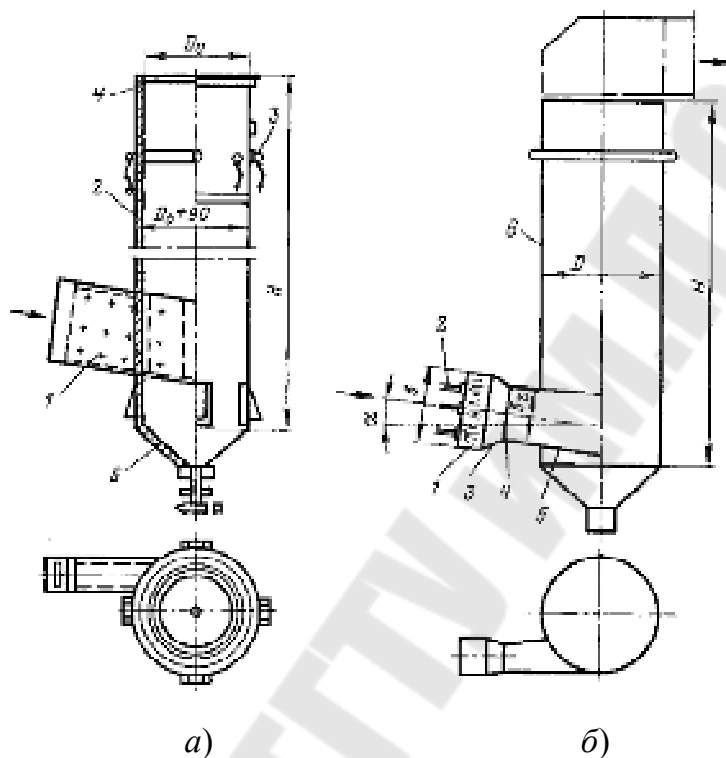


Рис. 1.2. Мокрые золоуловители: а – центробежный скруббер: 1 – входной патрубок запыленного газа; 2 – корпус золоуловителя; 3 – оросительные сопла; 4 – выход очищенного газа; 5 – бункер; б – золоуловитель с коагулятором Вентури: 1 – входной патрубок запыленного газа; 2 – подача воды через оросительные сопла; 3, 4, 5 – конфузор, горловина и диффузор коагулятора Вентури; б – скруббер-каплеуловитель

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 %).

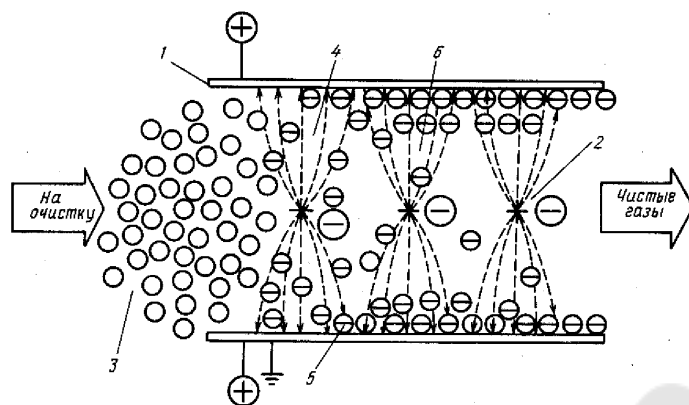


Рис. 1.3. Принцип работы электрофилтра: 1 – осадительный электрод; 2 – коронирующий электрод; 3 – частицы золы; 4 – электрическое поле; 5 – слой осевшей золы; 6 – заряженная зола

В электрофилтрах запыленный газ движется в каналах, образованных осадительными электродами 1 (рис. 1.3), между которыми расположены через определенное расстояние коронирующие электроды 2. 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.

Таблица 1

Средние эксплуатационные эффективности аппаратов пылеулавливания и газоочистки отходящих газов котельных

Аппарат, установка	Эффективность улавливания, %
Батарейные циклоны типа БЦ-2	85
Электрофильтры	97-99
Центробежные скрубберы ЦС-БТИ	88-90

### Методика расчета содержания твердых частиц, в дымовых газах теплоэнергоустановок

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

а) если имеются данные газового анализа, то расчет массы твердых частиц рассчитываются по формуле:

$$M_{мс} = B \cdot \frac{A^p}{(100 - \Gamma_{yn})} \cdot a_{yn} (1 - \eta_3) \cdot K_n, \quad (1.1)$$

где  $B$  – расход топлива (т/год, г/с);  $A^p$  – зольность топлива (%);  $\eta_3$  – доля твердых частиц, улавливаемых в золоуловителях;  $a_{yn}$  – доля золы топлива в уносе (%);  $\Gamma_{yn}$  – содержание горючего в уносе (%).

б) если нет данных газового анализа, то по формуле:

$$M_{мс} = 0,01 \cdot B \left( a_{yn} \cdot A^p + q_{yn} \cdot \frac{Q_n^r}{32,680} \right) \cdot (1 - \eta_3) \cdot K_n, \quad (1.2)$$

где  $B$  – фактический расход топлива, т/ч (т/г);  $a_{yn}$  – доля золы топлива в уносе;  $A^r$  – зольность топлива на рабочую массу, %;  $q_{yn}$  – потеря тепла суносом от механический недожога, %;  $Q_n^r$  – низшая теплота сгорания, Мдж/кг;  $\eta_3$  – доля твердых частиц, улавливаемая в золоуловителе котла;  $K_n$  – коэффициент пересчета: при определении выбросов в г/с равен  $0,278 \cdot 10^3$ , в т/г равен 1.



### **Задание**

Рассчитать массовый выброс твердых частиц за год при сжигании топлива, заданного в варианте согласно порядковому номеру в журнале.

Исходные данные (расход топлива на работу котлоагрегата при максимальной нагрузке  $B$  (т/ч), потери тепла от механической неполноты сгорания  $q_4$ , (%), низшая теплота сгорания  $Q_n^r$ , зольность угля на рабочую массу  $A$ , (%)) по вариантам приведены в Приложениях 1 и 6.

Эффективность работы золоуловителя приведена в таблице 1.

Продолжительность отопительного периода 194 дня (4656 часов).

Расчеты выполнить для случаев:

- а) за котлом установлен аппарат сухой инерционной очистки;
- б) центробежный скруббер;
- в) электрофильтр;
- г) золоуловитель отсутствует.

### **Пример**

Рассчитать выбросы твердых частиц в атмосферу от отопительной котельной, потребляющей в час 35 т каменного угля Кузбасского бассейна марки Д. Продолжительность отопительного периода 194 дня (4656 часов).

Решение.

Расход топлива на работу котлоагрегата при максимальной нагрузке  $B = 35$  т/ч, т/ч и потери тепла от механической неполноты сгорания  $q_4 = 0,21$  % (определяем по приложению 1). Теплотехнические характеристики углей (низшая теплота сгорания угля  $Q_n = 21,9$  МДж/кг; зольность угля (на рабочую массу)  $A = 15,9$  %) определяем по Приложениям 1 и 6.

Расчеты выполняются для случаев:

- 1) за котлом установлен аппарат сухой инерционной очистки;
- 2) центробежный скруббер;
- 3) электрофильтр;
- 4) золоуловитель отсутствует.

Средние эксплуатационные эффективности аппаратов пылеулавливания и газоочистки отходящих газов котельных приведены в таблице 1.

Так как нет данных газового анализа, то расчет выбросов твердых частиц в атмосферу ведется по формуле (1.2).

1. В случае, когда установлен аппарат сухой инерционной очистки количество выбросов твердых частиц составляет:

$$M_{\text{тв}} = 0,01 \cdot 35 \left( 0,8 \cdot 15,9 + 0,21 \cdot \frac{21,9}{32,680} \right) \cdot (1 - 0,85) \cdot 4656 = 3143,5 \text{ т/г.}$$

2. В случае, когда установлен центробежный скруббер:

$$M_{\text{тв}} = 0,01 \cdot 35 \left( 0,8 \cdot 15,9 + 0,21 \cdot \frac{21,9}{32,680} \right) \cdot (1 - 0,90) \cdot 4656 = 2095,6 \text{ т/г.}$$

3. В случае, когда установлен электрофильтр:

$$M_{\text{тв}} = 0,01 \cdot 35 \left( 0,8 \cdot 15,9 + 0,21 \cdot \frac{21,9}{32,680} \right) \cdot (1 - 0,99) \cdot 4656 = 209,6 \text{ т/г.}$$

4. В случае если золоуловитель отсутствует:

$$M_{\text{тв}} = 0,01 \cdot 35 \left( 0,8 \cdot 15,9 + 0,21 \cdot \frac{21,9}{32,680} \right) \cdot 4656 = 20956 \text{ т/г.}$$

## Практическая работа № 2

### ВЫБРОСЫ МАЗУТНОЙ ЗОЛЫ ПРИ СЖИГАНИИ МАЗУТА В ПЕРЕСЧЕТЕ НА ВАНАДИЙ ТЕПЛОЭНЕРГОУСТАНОВКАМИ С ДЫМОВЫМИ ГАЗАМИ В АТМОСФЕРЕ

#### Теоретическая часть

При сжигании мазута дополнительные загрязнители поступают в атмосферу в виде сажи, которые наносят существенный ущерб окружающей среде, поскольку являются носителями кислот и канцерогенов. Поэтому, несмотря на сравнительно небольшое количество выбрасываемой золы, на электростанциях, работающих на мазуте, необходимо применение золоулавливающих установок специальных типов. Для этих целей используются электрофильтры, сухие инерционные аппараты, скрубберы мокрой очистки и тканевые фильтры с эффективностью улавливания твердых частиц 80-99 %.

Мазутная зола представляет собой сложную смесь, состоящую в основном из оксидов металлов. Биологическое воздействие ее на окружающую среду рассматривается как воздействие единого целого. В качестве контролирующего показателя принят ванадий, по содержанию которого в золе установлен санитарно-гигиенический норматив (ПДК).

#### Методика расчета выбросов мазутной золы, поступающих в атмосферный воздух с дымовыми газами при сжигании мазута в пересчете на ванадий

Суммарное количество мазутной золы  $M_{м.з}$ , г/с (т/год, т/квартал, т/мес) в пересчете на ванадий, поступающей в атмосферу с дымовыми газами котла при сжигании мазута, вычисляют по формуле

$$M_{м.з} = G_v B (1 - \eta_{ос}) \left(1 - \frac{\eta_{зы}^v}{100}\right) k_n, \quad (2.1)$$

где  $G_v$  - количество ванадия, содержащегося в 1 т мазута, г/т;  $B$  - расход топлива на котел (т/ч, т/год);  $\eta_{ос}$  - доля ванадия, оседающего с твердыми частицами на поверхности нагрева мазутных котлов;  $\eta_{зы}^v$  - степень очистки дымовых газов от мазутной золы в золоулавливаю-

щих установках, %;  $k_{\Pi}$  - коэффициент пересчета; при определении выбросов в г/с  $k_{\Pi} = 0,278 \cdot 10^{-3}$ ; в т/год -  $k_{\Pi} = 10^{-6}$ .

Количество ванадия, содержащегося в 1 т мазута  $G_v$ , г/т, может быть определено одним из двух способов:

- по результатам химического анализа мазута:

$$G_v = a_v 10^4$$

где  $a_v$  - фактическое содержание элемента ванадия в мазуте, %;  $10^4$  - коэффициент пересчета;

- по приближенной формуле (при отсутствии данных химического анализа):

$$G_v = 2222A^p, \quad (2.2)$$

где 2222- эмпирический коэффициент;  $A^p$  - содержание золы в мазуте на рабочую массу, %.

Долю ванадия, оседающего с твердыми частицами на поверхности нагрева мазутных котлов  $\eta_{ос}$ , принимают равной:

- 0,07 - для котлов с промпароперегревателями, очистка поверхностей которых производится в остановленном состоянии,

- 0,05 - для котлов без промпароперегревателей при тех же условиях очистки,

- 0 - для остальных случаев;

Степень улавливания мазутной золы в пересчете на ванадий  $\eta_{zy}^v$ , %, в золоулавливающих установках вычисляется по формуле

$$\eta_{zy}^{(v)} = \eta_y C, \quad (2.3)$$

где  $\eta_{zy.общ}$  - общая степень улавливания твердых частиц при сжигании угля, %;

$C$  - коэффициент, равный:

0,6 - для электрофильтров,

0,5 - для мокрых аппаратов,

0,3 - для батарейных циклонов.

### **Задание**

1. Определить количество мазутной золы в пересчете на ванадий, которое выбрасывается в атмосферу с дымовыми газами при сжигании мазута в котлах с промпароперегревателями.

Расчеты выполняются для случаев:

а) за котлом установлен аппарат сухой инерционной очистки;

б) центробежный скруббер;

- в) электрофильтр;
- г) золоуловитель отсутствует.

2. Определить количество мазутной золы в пересчете на ванадий, которое выбрасывается в атмосферу с дымовыми газами при сжигании мазута в котлах без промпароперегревателей.

Расчеты выполняются для случаев:

- а) за котлом установлен аппарат сухой инерционной очистки;
- б) центробежный скруббер;
- в) электрофильтр;
- г) золоуловитель отсутствует.

Эффективность работы золоуловителя определяем по таблице 1.

Исходные данные по вариантам (согласно порядковому номеру в журнале) приведены в Приложении 2.

### *Пример*

Рассчитать выбросы мазутной золы за год (4656 рабочих часов) при сжигании мазута в пересчете на ванадий, поступающей в атмосферный воздух с дымовыми газами от отопительной котельной, потребляющей в час 35 т мазута. Котел с промпароперегревателями, зольность мазута (на рабочую массу)  $A = 0,03 \%$ .

Решение.

Расчеты выполняются для случаев:

- 1) за котлом установлен аппарат сухой инерционной очистки;
- 2) центробежный скруббер;
- 3) электрофильтр;
- 4) золоуловитель отсутствует.

Средняя эксплуатационная эффективность аппаратов пылеулавливания и газоочистки отходящих газов котельных приведены в таблице 1.

Количество ванадия, содержащегося в 1 т мазута  $G_v$ , г/т определяется по формуле 2.2:

$$G_v = 2222A^p = 2222 \cdot 0,03 = 20 \text{ г/т.}$$

Степень улавливания мазутной золы в пересчете на ванадий  $\eta_{zy}^v$ , %, в золоулавливающих установках вычисляется по формуле 2.3:

- 1)  $\eta_{zy}^{(v)} = 0,85 \cdot 0,3 = 0,26$ ;
- 2)  $\eta_{zy}^{(v)} = 0,95 \cdot 0,5 = 0,48$ ;
- 3)  $\eta_{zy}^{(v)} = 0,99 \cdot 0,6 = 0,6$ ;

$$4) \eta_{\text{зy}}^{(v)} = 0.$$

Суммарное количество мазутной золы в пересчете на ванадий, поступающей в атмосферу с дымовыми газами котла при сжигании мазута, вычисляют по формуле (2.1): В случае, когда установлен аппарат сухой инерционной очистки количество выбросов твердых частиц составляет:

1) если за котлом установлен аппарат сухой инерционной очистки:

$$M_{\text{мз}} = 20 \cdot 35 \cdot (1 - 0,7) \cdot \left(1 - \frac{0,26}{100}\right) \cdot 10^{-6} \cdot 4656 = 0,975 \text{ т/год};$$

2) в случае, когда установлен центробежный скруббер:

$$M_{\text{мз}} = 20 \cdot 35 \cdot (1 - 0,7) \cdot \left(1 - \frac{0,48}{100}\right) \cdot 10^{-6} \cdot 4656 = 0,972 \text{ т/год};$$

3) в случае, когда установлен электрофильтр:

$$M_{\text{мз}} = 20 \cdot 35 \cdot (1 - 0,7) \cdot \left(1 - \frac{0,6}{100}\right) \cdot 10^{-6} \cdot 4656 = 0,971 \text{ т/год};$$

4) если золоуловитель отсутствует:

$$M_{\text{мз}} = 20 \cdot 35 \cdot (1 - 0,7) \cdot 10^{-6} \cdot 4656 = 0,977 \text{ т/год}.$$

## Практическая работа № 3

### ВЫБРОСЫ САЖИ И БЕНЗ(А)ПИРЕНА ТЕПЛОЭНЕРГОУСТАНОВКАМИ С ДЫМОВЫМИ ГАЗАМИ В АТМОСФЕРЕ

#### Теоретическая часть

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, поступающее 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.

#### Методика расчета содержания выбросов сажи и бенз(а)пирена в дымовых газах теплоэнергоустановок

Количество сажи, образующейся в топке в результате недожога топлива и выбрасываемых в атмосферу при сжигании мазута, дизельного и др. топлив определяется по формуле:

$$M_{\text{тв}} = 0,01 \cdot V_{q_{\text{ун}}} \cdot \frac{Q_{\text{н}}^{\text{р}}}{32,680} \cdot (1 - \eta_{\text{з}}) \cdot K_{\text{п}}, \quad (3.1)$$

где  $B$  – фактический расход топлива, т/ч (т/г);  $q_{\text{ун}}$  – потеря тепла с уносом от механический недожога, %;  $Q_n^p$  – низшая теплота сгорания, МДж/кг;  $\eta_3$  – доля твердых частиц, улавливаемая в золоуловителе котла;  $K_{\text{п}}$  – коэффициент пересчета: при определении выбросов в г/с равен  $0,278 \cdot 10^3$ , в т/г равен 1.

Максимальное количество бенз(а)пирена, выбрасываемого в атмосферный воздух с дымовыми газами, рассчитывается по формуле

$$M = C \cdot V_{\text{sg}} \cdot B \cdot K_{\text{п}},$$

где  $B$  – расход топлива, т/ч (т/г);  $V_{\text{sg}}$  – объем сухих газов;  $K_{\text{п}}$  – коэффициент пересчета: при определении выбросов в г/с равен  $0,278 \cdot 10^{-3}$ , в т/г равен  $10^{-6}$ .

$$C_{\text{bp}}^{\text{tv}} = 10^{-3} \frac{A \cdot Q_n^r}{e^{1,5 \cdot \alpha_{\text{tv}}}} \cdot K_d \cdot K_{\text{zy}},$$

где  $A$  – коэффициент, учитывающий конструкцию нижней части топki: при жидком шлакоудалении равен 0,378; при твердом шлакоудалении 0,521;  $Q_n^r$  – низшая рабочая теплота сгорания топлива, МДж/кг;  $\alpha$  – коэффициент избытка воздуха ( $\alpha = 1,4$ );  $K_{\text{п}}$  – коэффициент, учитывающий нагрузку котла;  $K_d$  – коэффициент, учитывающий степень улавливания бенз(а)пирена золоуловителем.

Коэффициент, учитывающий нагрузку котла  $K_d$ , рассчитывается по формуле:

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

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

Коэффициент, учитывающий степень улавливания бенз(а)пирена золоуловителем  $K_d$ , рассчитывается по формуле:

$$K_{\text{zy}} = 1 - \eta_{\text{zy}} \cdot Z / 100,$$

где  $\eta_{\text{zy}}$  – степень очистки газов в золоуловителе по золе, %;  $Z$  – коэффициент, учитывающий снижение улавливающей способности золоуловителем бенз(а)пирена:

а) при температуре газов перед золоуловителем больше  $185^\circ\text{C}$ :



- Z равен 0,8 - для сухих золоуловителей;
- Z равен 0,9 - для мокрых золоуловителей;
- б) при температуре газов перед золоуловителем меньше 185°C:
  - Z равен 0,7 - для сухих золоуловителей;
  - Z равен 0,8 - для мокрых золоуловителей.

### ***Задание***

1. Рассчитать количество сажи, образующееся в топке в результате недожога топлива и выбрасываемых в атмосферу за год (количество часов работы котла 5000 ч.).

Расчеты выполнить для случаев:

- 1) за котлом установлен аппарат сухой инерционной очистки;
- 2) центробежный скруббер;
- 3) электрофильтр;
- 4) золоуловитель отсутствует.

2. Рассчитать выброс количества бенз(а)пирена за год (количество часов работы котла 4656 ч.).

Расчеты выполнить для случаев:

- 1) за котлом установлен аппарат сухой инерционной очистки;
- 2) центробежный скруббер;
- 3) электрофильтр;
- 4) золоуловитель отсутствует.

Исходные данные по вариантам (согласно порядковому номеру в журнале) приведены в Приложении 2.

Дополнительные данные, необходимые для расчета приведены в Приложении 6.

### ***Пример***

Рассчитать выбросы сажи в атмосферу от отопительной котельной, потребляющей в час 25 т угля Донецкого бассейна марки Г. Продолжительность отопительного периода 194 дня (4656 часов).

Решение.

Расход топлива на работу котлоагрегата при максимальной нагрузке  $B = 25$  т/ч, т/ч и потери тепла от механической неполноты сгорания  $q_4 = 0,18\%$  (определяем по приложению 1). Теплотехнические характеристики углей определяем по Приложениям 1 и 6: низшая те-

плота сгорания угля  $Q_H = 21,9$  МДж/кг; зольность угля (на рабочую массу)  $A = 18,92$  %.

Расчеты выполняются для случаев:

- 2) за котлом установлен аппарат сухой инерционной очистки;
- 2) центробежный скруббер;
- 3) электрофильтр;
- 5) золоуловитель отсутствует.

Средние эксплуатационные эффективности аппаратов пылеулавливания и газоочистки отходящих газов котельных приведены в таблице 1.

Расчет количества сажи ведется по формуле (3.1):

$$M_{\text{ТВ}} = 0,01 \cdot V_{q_{\text{УН}}} \cdot \frac{Q_H^p}{32,680} \cdot (1 - \eta_3) \cdot K_{\text{п}}.$$

1. В случае, когда установлен аппарат сухой инерционной очистки

$$M_{\text{ТВ}} = 0,01 \cdot 25 \cdot 0,8 \cdot \frac{21,9}{32,680} \cdot (1 - 0,85) \cdot 4656 = 90,8 \text{ т/г.}$$

2. В случае, когда установлен центробежный скруббер:

$$M_{\text{ТВ}} = 0,01 \cdot 25 \cdot 0,8 \cdot \frac{21,9}{32,680} \cdot (1 - 0,9) \cdot 4656 = 60,5 \text{ т/г.}$$

3. В случае, когда установлен электрофильтр:

$$M_{\text{ТВ}} = 0,01 \cdot 25 \cdot 0,8 \cdot \frac{21,9}{32,680} \cdot (1 - 0,99) \cdot 4656 = 6,055 \text{ т/г.}$$

4. В случае если золоуловитель отсутствует:

$$M_{\text{ТВ}} = 0,01 \cdot 25 \cdot 0,8 \cdot \frac{21,9}{32,680} \cdot 4656 = 605,28 \text{ т/г.}$$

## Практическая работа № 4

### **ВЫБРОСЫ ОКСИДОВ СЕРЫ ТЕПЛОЭНЕРГОУСТАНОВКАМИ С ДЫМОВЫМИ ГАЗАМИ В АТМОСФЕРУ**

#### **Теоретическая часть**

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

Существуют мероприятия, предназначенные для уменьшения выбросов двуокиси серы. К ним относятся:

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

#### *Предварительное извлечение серы*

##### *в результате обогащения жидкого и твердого топлива*

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 снижения содержания серы (вакуумное отделение тяжелой части нефти, гидрообессеривание легких компонентов с последующим смешением с частью тяжелых остатков).

### *Связывание серы в процессе сжигания топлива*

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 (рис. 4.1).

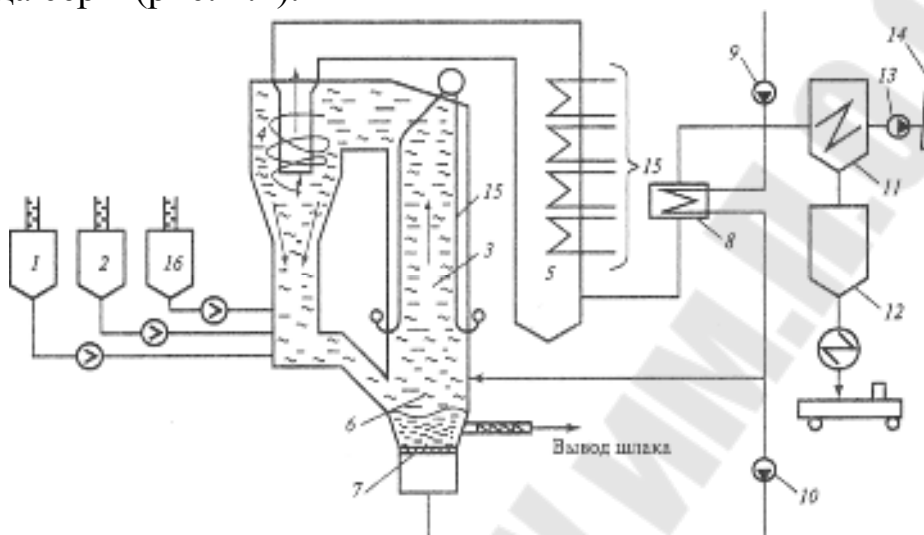


Рис. 4.1. Схема котла с топкой с циркулирующим кипящим слоем при атмосферном давлении (не под наддувом): 1 – бункер известняка; 2 – бункер топлива; 3 – топка котла; 4 – циклон; 5 – опускная конвективная шахта; 6 – кипящий слой; 7 – воздухоразделяющая плита; 8 – РВП; 9 – дутьевой вентилятор; 10 – высоконапорный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

Перспективным является использование КС под давлением, что позволяет улавливать до 90 %  $\text{SO}_2$ .

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

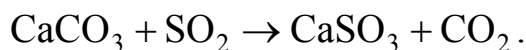
### *Очистка дымовых газов от оксидов серы*

#### ***Мокроизвестняковый способ очистки дымовых газов от $\text{SO}_2$***

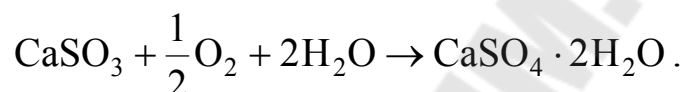
Мокроизвестняковый способ (МИС) основан на интенсивной промывке дымовых газов в абсорбере, установленном за высокоэффективным золоуловителем, известняковой суспензией с получением двухводного гипса. Эта технология является абсолютно безопасной,

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



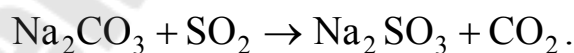
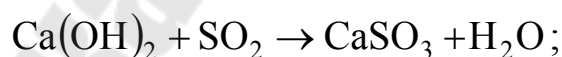
Процесс протекает в абсорбере башенного циркуляционного типа. В нижней части абсорбера накапливается суспензия сульфита кальция. При барботаже воздуха через слой этой суспензии происходит доокисление сульфита кальция в двухводный сульфат кальция (гипс) по реакции



#### ***Мокросухой способ очистки дымовых газов от SO<sub>2</sub>***

Способ основан на эффективном поглощении SO<sub>2</sub> известью Ca(OH)<sub>2</sub> или содой Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>.

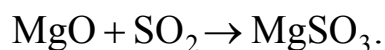
Мокросухим (МСС) называется такой способ, когда в полый абсорбер, продуваемый дымовыми газами, впрыскивают суспензию, которая связывает диоксид серы, а жидкость суспензии за счет теплоты дымовых газов полностью испаряется. При этом имеют место реакции с образованием сульфитов кальция или натрия:



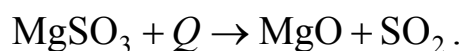
Если абсорбер установлен перед золоулавливающей установкой, то продукты сероочистки сорбируются вместе с летучей золой и складироваться на золоотвале.

#### ***Магнетитовый способ очистки дымовых газов от SO<sub>2</sub>***

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



Полученный твердый сульфит магния обезвоживается и подвергается термическому разложению при температуре 900 °С с образованием концентрированного сернистого ангидрида SO<sub>2</sub> и оксида магния



Концентрированный SO<sub>2</sub> 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.

В очистке дымовых газов наиболее распространенным является метод с прямой абсорбцией диоксида серы из отходящих газов с помощью извести или известняка. Кроме этого используется абсорбция на активированном угле, каталитическое восстановление и окисление, и другие способы.

### **Методика расчета содержания сернистых соединений в дымовых газах теплоэнергоустановок**

Некоторая доля оксидов серы связывается летучей золой в котле, некоторая - в мокрых золоуловителях.

Расчет выбросов оксидов серы в пересчете на SO<sub>2</sub> (т/год) выполняется по формуле:

$$M_{\text{SO}_2} = 0,02 \cdot B \cdot S^p (1 - \eta'_{\text{SO}_2})(1 - \eta''_{\text{SO}_2}), \quad (4.1)$$

где  $B$  – расход твердого, жидкого (т/год) и газообразного топлива (тыс. м<sup>3</sup>/год);  $S^p$  – содержание серы в топливе (%) (сернистость), мг/м<sup>3</sup>;  $\eta'_{\text{SO}_2}$  – доля оксидов серы, связываемых летучей золой в котле;  $\eta''_{\text{SO}_2}$  – доля оксидов серы, улавливаемых в мокром 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  $\eta'_{\text{SO}_2}$  (доля оксидов серы, связываемых летучей золой в котле) при сжигании различных видов топлива в зависимости от вида и марки топлива даны ниже в таблице 2.

Таблица 2

Вид топлива	$\eta'_{\text{SO}_2}$
торф.....	0,15
сланцы.....	0,8
бурый уголь марки 1Б	0,2
бурый уголь марки 2Б	0,5
бурый уголь марки 3Б	0,65
Каменный уголь марки Д	0,2
Каменный уголь марки Г	0,08
Каменный уголь марки Ж	0,16
Каменный уголь марки Т	0,14
Каменный уголь марки А	0,12
дрова	0,09
мазут.....	0,02
газ.....	0,0

Доля оксидов серы, улавливаемых в сухих золоуловителях принимается равной нулю.

В мокрых золоуловителях  $\eta''_{\text{SO}_2}$  зависит, в основном, от расхода и общей щелочности орошающей воды и от приведенной сернистости топлива, которая рассчитывается по формуле:

$$S^{\text{np}} = \frac{S_{\text{o+k}}}{Q_{\text{H}}^{\text{p}}}, \quad (4.2)$$

где  $S_{\text{o+k}}$  - содержание серы органической и колчеданной в рабочей массе топлива, в %;

$Q_{\text{H}}^{\text{p}}$  - низшая теплота сгорания топлива, Мдж/кг.

Содержание серы в рабочей массе топлива определяется в зависимости от марки топлива и месторождения по Приложению 6.

Доля оксидов серы улавливаемых в мокрых золоуловителях  $\eta''_{\text{SO}_2}$  определяется по рис. 4.2 в зависимости от заданной щелочности орошающей воды.

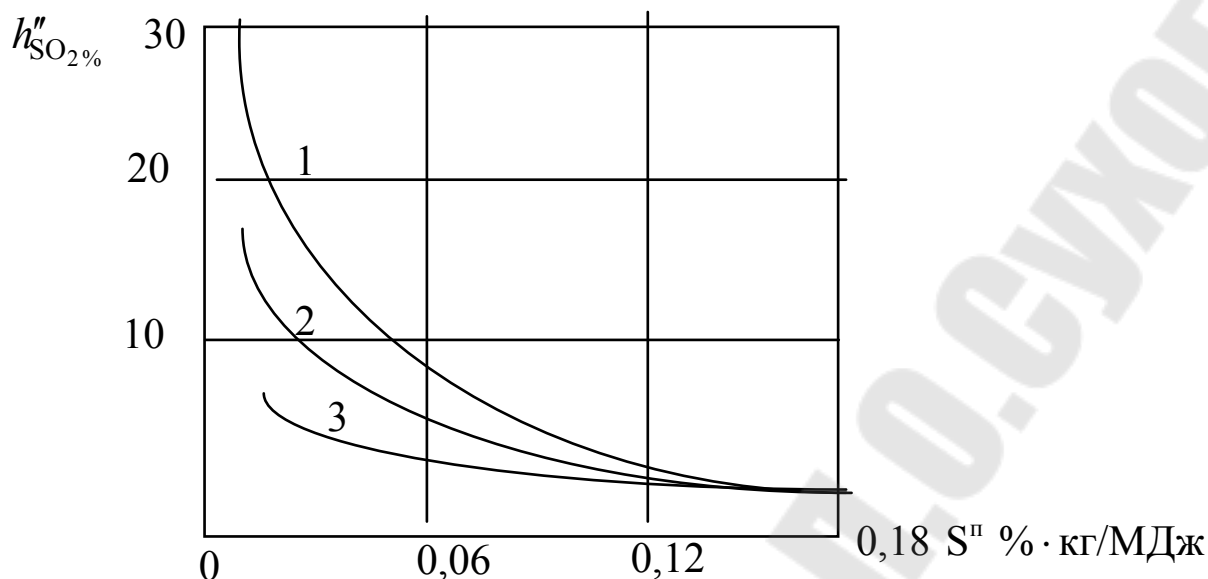


Рис. 4.2. Степень улавливания оксидов серы в мокрых золоуловителях  $h''$  :  
 при щелочности орошаемой воды 10 мг/(моль·л) - график 1;  
 5 мг/(моль·л) - график 2; 0 мг/(моль·л) - график 3;  
 $S''$  – приведенная сернистость топлива

### Задание

Рассчитать массовый выброс оксидов серы за год при сжигании топлива (количество часов работы котла 4656 ч.). Расчет произвести для случаев:

- при условии работы скруббера.
- при условии работы электрофилтра
- при отсутствии золоуловителя.

Исходные данные (расход топлива на работу котлоагрегата при максимальной нагрузке, низшая теплота сгорания  $Q_n^r$ , щелочность орошающей воды в мокром золоуловителе) приведены в Приложении 3 по вариантам (согласно порядковому номеру в журнале)

Дополнительные данные, необходимые для расчета приведены в Приложении 6.

### Пример

Рассчитать выбросы оксидов серы в атмосферу от отопительной котельной, потребляющей в час 40 т угля Донецкого бассейна марки Г. Продолжительность отопительного периода 4656 часов. Щелочность орошающей воды в золоуловителе составляет 5 мгэкв/кг.

Решение:



Расход топлива на работу котлоагрегата при максимальной нагрузке  $B = 40$  т/ч, т/ч (определяем по приложению 3). Теплотехнические характеристики углей определяем по Приложениям 3 и 6: низшая теплота сгорания угля  $Q_n = 18,92$  МДж/кг; сернистость угля (на рабочую массу)  $S_{o+k} = 3$  %.

Приведенная сернистость угля Донецкого бассейна марки Г

$$S^{пр} = \frac{S_{o+k}}{Q_n^p} = \frac{3}{18,92} = 0,15.$$

Ориентировочное значение  $\eta'_{so_2}$  (доля оксидов серы, связываемых летучей золой в котле) при сжигании каменного угля марки Г  $\eta'_{so_2} = 0,08$ .

По рисунку 4.2 (по график 2) определяем долю оксидов серы, улавливаемых в мокрых золоуловителях  $\eta''_{so_2} = 0,05$ .

Расчет выбросов оксидов серы в пересчете на  $SO_2$  (т/год) выполняется по формуле (4.1):

а) в случае работы скруббера:

$$M_{so_2} = 0,02 \cdot 30 \cdot 3(1 - 0,08)(1 - 0,05) \cdot 4656 = 7324,8 \text{ т/г.}$$

б) и в) при отсутствии золоуловителя, а также или при сухих золоуловителях или электрофильтрах:

$$M_{so_2} = 0,02 \cdot 30 \cdot 3(1 - 0,08) \cdot 4656 = 1,76 \cdot 5616 = 8194,5 \text{ т/г.}$$

## Практическая работа № 5

# ВЫБРОСЫ ОКСИДОВ АЗОТА ТЕПЛОЭНЕРГОУСТАНОВКАМИ ДЫМОВЫМИ ГАЗАМИ В АТМОСФЕРУ

### Теоретическая часть

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

Для обеспечения норм содержания окислов 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.

К технологическим способам подавление образования окислов азота относятся:

- подача газов рециркуляции в зону горения;
- ступенчатый ввод воздуха в топку;
- впрыск воды (пара) в ядро факела

### *Горелки с низким выбросом NO<sub>x</sub>*

У горелок с низким выбросом 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 сго-

рания топлива. Кроме того, конструкция горелки (рис. 5.1) позволяет поддерживать рециркуляцию воздуха внутри зоны горения.

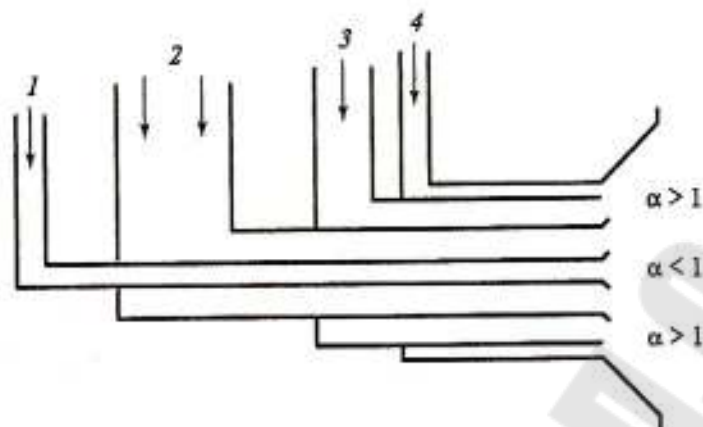


Рис. 5.1. Принципиальная схема пылеугольной горелки с низким выбросом  $\text{NO}_x$ : 1 – первичный воздух; 2 – пылевоздушная смесь; 3 – вторичный воздух; 4 – третичный воздух

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. 5.2). В первой (нижней) зоне топки сжигается основное количество топлива (70–85 %) при избытке воздуха, близком к единице. На выход из зоны активного горения подается оставшая часть топлива (15–30 %) и соответствующее количество воздуха с таким расчетом, чтобы суммарный избыток воздуха в ней составлял 0,9–0,95 % (т. е. небольшой недостаток для полного сжигания топлива), благодаря чему в этой части топки создается зона восстановления оксидов азота  $\text{NO}$  до  $\text{NO}_2$ .

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. 5.2. Принципиальная схема трехступенчатого сжигания топлива в топке

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. 5.3).

Для улучшения перемешивания газов рециркуляции с воздухом, который поступает в топочную камеру, устанавливают смесители. Дымовые рециркулирующие газы снижают концентрацию кислорода в зоне горения топлива и температуру 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 %.

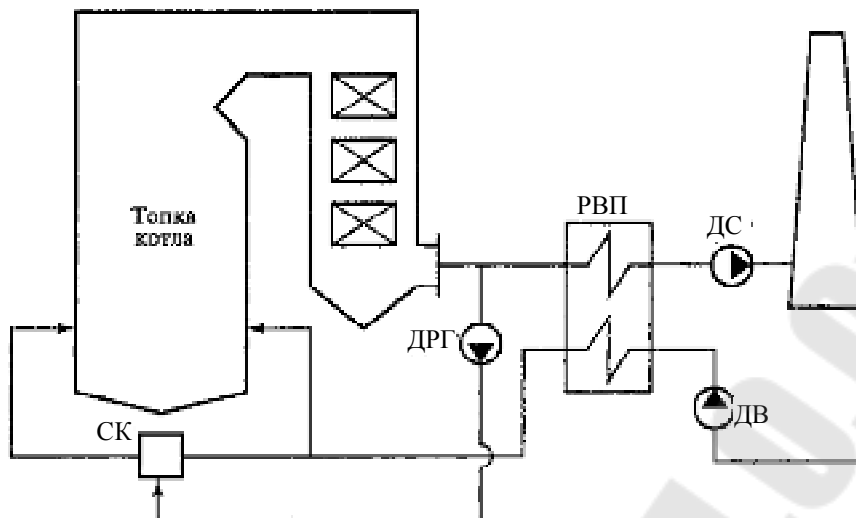


Рис. 5.3. Принципиальная схема рециркуляции дымовых газов котла с использованием дымососов рециркуляции газов

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

#### ***Впрыск воды (пара) в ядро факела***

Впрыск воды в ядро факела снижает температуру в нем и тем самым препятствует образованию термических оксидов азота. Количество впрыскиваемой воды может составлять до 15 % расхода топлива. Этот способ применяется в основном в период неблагоприятных метеоусловий в районах с повышенной фоновой концентрацией вредных веществ.

Этот способ снижает выбросы  $\text{NO}_x$  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  $\text{NO}_x$  при сжигании твердого топлива используются комбинации следующих первичных мероприятий: использование специальных горелок, ступенчатая по-

дача 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 450–550 мг/м с котлами, сжигающими каменные угли и концентрация 300–350 мг/м с котлами, сжигающими бурые угли.

В некоторых странах разрабатываются и применяются в промышленности, в основном, три схемы очистки дымовых газов от NO<sub>x</sub>:

- 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<sub>2</sub>.

### **Методика расчета выбросов оксидов азота в дымовых газах теплоэнергоустановок**

Расчет выбросов оксидов азота в пересчете на NO<sub>2</sub> (т/год, г/с, ...), поступающих в атмосферный воздух с дымовыми газами при сжигании газообразного, твердого и жидкого топлив выполняется по формуле:

$$M_{NO_2} = 0,34 \cdot 10^{-7} \cdot K_{NO_2} \cdot B \cdot Q_p \left(1 - \frac{q_4}{100}\right) \cdot \beta_1 (1 - \varepsilon_1 \cdot r) \cdot \beta_2 \cdot \beta_3 \cdot \varepsilon_2, \quad (5.1)$$

где  $K_{NO_2}$  – удельный выброс оксидов азота (кг/т условного топлива);  $B$  – расход топлива за период (т/год, тыс. м<sup>3</sup>/год, г/с, л/с);  $\beta_1$  – коэффициент, учитывающий влияние содержания азота в топливе на выход оксидов азота;  $\beta_2$  – коэффициент, учитывающий конструкцию горелок (для вихревых  $\beta_2 = 1$ , для прямоточных  $\beta_2 = 0,85$ );  $\beta_3$  – коэффициент, учитывающий вид шлакоудаления; при жидком шлакоудалении  $\beta_3 = 1,4$ , во всех остальных случаях  $\beta_3 = 1$ ;  $\varepsilon_1$  – коэффициент, характеризующий эффективность воздействия рециркулирующих газов в зависимости от условий их подачи в топку (примем  $\varepsilon_1 = 0,25$  для мазута,  $\varepsilon_1 = 0,01$  для угля);  $\varepsilon_2$  – коэффициент, характеризующий снижение выброса оксидов азота при подаче части воздуха помимо основных горелок (при двухступенчатом сжигании), определяется по рис. 5.4 при условии сохранения общего избытка воздуха за котлами;  $r$  – степень рециркуляции дымовых газов (%).

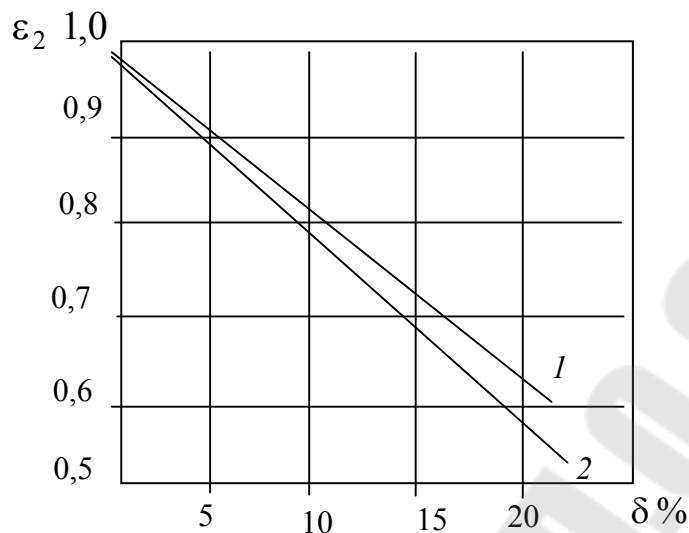


Рис. 5.4. График для определения значения коэффициента  $\varepsilon_2$  :

1 – газ, мазут; 2 – уголь;  $\delta$  – доля воздуха, подаваемого помимо основных горелок

Коэффициент  $K_{NO_2}$  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

$$K_{NO_2} = \frac{12D_{\phi}}{200 + D_n},$$

где  $D_n$  и  $D_{\phi}$  – номинальная и фактическая паропроизводительность котла (т/ч).

Для котлов паропроизводительностью 30–70 т/ч

$$K_{NO_2} = \frac{D_{\phi}}{20 + D_n}.$$

Для водогрейных котлов мощностью более 125 ГДж/ч (30 Гкал/ч) коэффициент  $K_{NO_2}$  определяется по формуле

$$K_{NO_2} = \frac{2,5 \cdot Q_{\phi}}{84 + Q_n},$$

где  $Q_n$ ,  $Q_{\phi}$  – номинальная и фактическая тепловая мощность котла (ГДж/ч).

Значения  $\beta_1$  для энергетических котлов, в которых сжигается жидкое и газообразное топливо принимается равным:

Коэффициент избытка воздуха в топочной камере $\alpha$	$\beta_1$	
	мазут	газ
более 1,05	1	0,9
от 1,03 до 1,05	0,9	0,8
менее 1,03	0,75	0,7

Значения  $\beta_1$  для котлов, в которых сжигается твердое топливо, определяются по формуле

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

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

### ***Задание***

Рассчитать массовый выброс оксидов азота за год при сжигании топлива.

Исходные данные (вид топлива, расход топлива на работу котлоагрегата при максимальной нагрузке, низшая теплота сгорания  $Q_n^r$ , содержание азота в топливе, коэффициенты, учитывающие методы сжигания, номинальная паропроизводительность котла) приведены в Приложении 4 по вариантам.

Расчет выполнить:

а) для прямоточных горелок при наличии рециркуляции газов (10 %);

б) для вихревых горелок при отсутствии рециркуляции газов.

Дополнительные данные, необходимые для расчета приведены в Приложении 6.

### ***Пример***

Рассчитать выбросы оксидов азота в атмосферу от отопительной котельной, потребляющей в час 40 т угля. Горелки вихревые. Сжигание топлива двухступенчатое. Степень рециркуляции дымовых газов 20 %. Шлакоудаление жидкое. Содержание азота в угле 0,5 %. Потери теплоты вследствие механической неполноты сгорания топлива  $q_4 = 0,5$  %,  $\beta_1 = 0,41$  – коэффициент, учитывающий влияние содержа-



ния азота в топливе на выход оксидов азота. Доля воздуха, подаваемого помимо основных горелок 13 %. Низшая теплота сгорания угля  $Q_H = 35,3$  МДж/кг. Номинальная паропроизводительность котла  $D_H = 420$  т/ч.

Продолжительность отопительного периода 5000 часов.

Решение.

Выбросы оксидов азота в пересчете на  $NO_2$  (т/год, г/с, ...), поступающих в атмосферный воздух с дымовыми газами при сжигании газообразного, твердого и жидкого топлив вычисляется по формуле (5.1).

$\varepsilon_1$  – коэффициент, характеризующий эффективность воздействия рециркулирующих газов в зависимости от условий их подачи в топку для угля составляет 0,01.

$\varepsilon_2$  – коэффициент, характеризующий снижение выброса оксидов азота при подаче части воздуха помимо основных горелок (при двухступенчатом сжигании), при условии сохранения общего избытка воздуха за котлами. Он определяется по рис. 5.4 и составляет 0,72.

$\beta_2$  – коэффициент, учитывающий конструкцию горелок (для вихревых  $\beta_2 = 1$ ).

$\beta_3 = 1,4$  при жидком шлакоудалении.

Удельный выброс оксидов азота (кг/т, условного топлива) составит

$$K_{NO_2} = \frac{12D_\phi}{200 + D_H} = \frac{12 \cdot 0,75 \cdot 420}{200 + 420} = 6,09.$$

Массовый выброс оксидов азота за год:

$$M_{NO_2} = 0,34 \cdot 10^{-7} \cdot 6,09 \cdot 40 \cdot 35,3 \cdot 1000 \cdot \left(1 - \frac{0,5}{100}\right) \cdot 0,41 \cdot (1 - 0,03 \cdot 20) \times \\ \times 1,4 \cdot 0,72 \cdot 5000 = 200 \text{ т / год.}$$

## Практическая работа № 6

### РАСЧЕТ КОЛИЧЕСТВА ОКСИДА УГЛЕРОДА В ДЫМОВЫХ ГАЗАХ ТЕПЛОЭНЕРГОУСТАНОВОК

#### Теоретическая часть

Уменьшить выбросы СО значительно сложнее, чем выбросы других вредных веществ. Очистка уходящих газов ТЭС от СО аппаратными средствами 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.

Химические методы очистки также не нашли промышленного применения. Используется в основном дожигание СО до СО<sub>2</sub> при высоком содержании СО, при низком - используют каталитическое окисление.

#### Методика расчета количества оксида углерода в дымовых газах теплоэнергоустановок

Количество оксида углерода  $M_{CO}$ , г/с, выбрасываемого в атмосферный воздух с дымовыми газами, рассчитывается по формуле:

$$M_{CO} = V C_{CO} K_{п} \quad (6.1)$$

где  $V$  – расход топлива на работу котлоагрегата при номинальной нагрузке, кг/с (нм<sup>3</sup>/с);  $C_{CO}$  – выход углерода оксида при сжигании топлива г/кг (г/нм<sup>3</sup>);  $K_{п}$  – коэффициент пересчета: при определении выбросов в г/с равен  $0,278 \cdot 10^3$ , в т/г равен  $10^{-3}$ .

Выход углерода оксида  $C_{CO}$ , г/кг или г/нм<sup>3</sup>, рассчитывается по формуле:

$$C_{CO} = q_3 R Q_n^p / 1,013,$$

где  $q_3$  – потери тепла вследствие химической неполноты сгорания топлива;  $R$  – коэффициент, учитывающий долю потери тепла вследствие химической неполноты сгорания топлива, обусловленную наличием в продуктах неполного сгорания углерода оксида углерода,  $Q_n^p$  – низшая рабочая теплота сгорания топлива, МДж/кг (МДж/нм<sup>3</sup>).

Для газообразного топлива при расчете выбросов оксида углерода величина расхода топлива  $V$  имеет размерность [нл/с] - при оп-

ределении максимальных выбросов в г/с., [тыс. нм<sup>3</sup>/год] - при определении валовых выбросов в т/год.

Потери тепла вследствие химической неполноты сгорания топлива  $q_3$ , % в зависимости от вида топлива принимаются равными:

$q_3 = 0,04$  % - при сжигании газообразного топлива;

$q_3 = 0,09$  % - при сжигании жидкого топлива;

$q_3 = 0,2$  % - при сжигании твердого топлива.

Коэффициент, учитывающий долю потери тепла вследствие химической неполноты сгорания топлива, обусловленную наличием в продуктах неполного сгорания углерода оксида  $R$ , принимается для:

твердого топлива..... 1,0

мазута..... 0,65

газа..... 0,5

### ***Задание***

Рассчитать массовый выброс оксидов углерода за год при сжигании топлива (по соответствующему варианту).

Исходные данные по вариантам (согласно порядковому номеру в журнале) приведены в Приложении 2.

Дополнительные данные, необходимые для расчета приведены в Приложении 6.

### ***Пример***

Рассчитать выбросы оксидов углерода в атмосферу от отопительной котельной, потребляющей в час 40 т угля Донецкого бассейна марки Г. Низшая теплота сгорания 22 МДж/кг. Продолжительность отопительного периода 194 дня (4656 часов).

Количество оксида углерода  $M_{CO}$ , г/с, выбрасываемого в атмосферный воздух с дымовыми газами, рассчитывается по формуле (6.1).

Выход углерода оксида  $C_{CO}$ , г/кг или г/нм<sup>3</sup>, для угля составляет:

$$C_{CO} = 0,2 \cdot 22 / 1,013 = 4,34 \text{ г/кг.}$$

Расход топлива  $V = 40 \text{ т/ч} = 40000 / 3600 = 11,11 \text{ кг/с.}$

$$M_{CO} = VC_{CO} K_{II} = 11,11 \cdot 4,34 \cdot 10^{-3} \cdot 4656 = 224,5 \text{ т/год}$$

## Практическая работа № 7

### МЕТОДЫ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД

#### Теоретические сведения

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.

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. 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.

Перспективными направлениями решения проблемы эффективной очистки сточных вод являются: 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. Процесс водопользования в таких системах должен рассматриваться как замкнутый цикл использования воды 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

раздельных потоков сточных вод с применением как традиционных, так и новых перспективных технологий.

Наиболее часто используются 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).

### **Определение концентрации взвешенных частиц гравиметрическим методом**

Метод измерения массовой концентрации взвешенных веществ заключается в фильтровании проб сточных вод через бумажный или мембранный фильтры определенного объема анализируемой воды, промывке осадка растворителем, высушивании отфильтрованных частиц и взвешивании высушенного осадка. Привес высушенных взвешенных частиц должен находиться в пределах 10–250 мг.

Данный метод применим для технической, оборотной и сточной воды, содержащей нефтепродукты.

***Средства измерений, вспомогательные устройства, реактивы и материалы:***

- весы лабораторные класс точности 1.2;
- сушильный шкаф с терморегулятором и термометром до 200 °С;
- эксикатор;
- фильтры бумажные;
- фильтры мембранные;
- бюксы стеклянные;
- воронки стеклянные;
- стаканы термостойкие;
- воронка Зейтца или прибор Олихова;
- вода дистиллированная;

– кальций хлористый плавленный или кальций хлористый гранулированный.

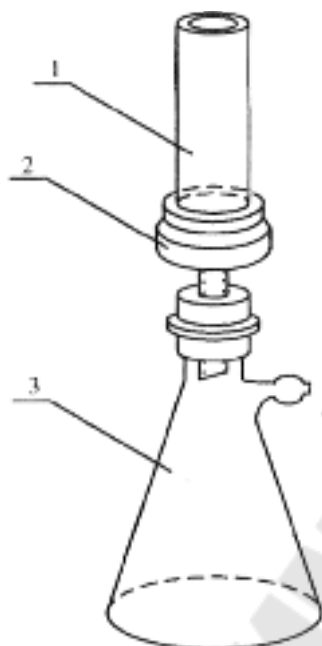


Рис. 7.1. Устройство для фильтрации через мембранный фильтр:  
1 - аппарат Олихова; 2 - резиновая трубка; 3 - колба с тубусом

### **Выполнение измерений**

Вставляют фильтр в стеклянную воронку и промывают его дистиллированной водой ( $\sim 200 \text{ см}^3$ ). Промытый фильтр высушивают в сушильном шкафу, после чего его взвешивают.

Фильтры по одному помещают в стакан на  $200 \text{ см}^3$ , наполненный на  $2/3$  объема дистиллированной водой, нагретой до  $80 \text{ }^\circ\text{C}$ , 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 подсушивают.

Бюкс с фильтром взвешивают. Для проверки постоянства массы фильтр повторно высушивают в сушильном шкафу в течение 30 мин.

Разница в массе не должна превышать  $0,0002 \text{ г}$ .

Анализируемую пробу фильтруют через доведенный до постоянной массы мембранный фильтр, закрепленный в аппарате Олихова, в колбу для фильтрации, которую соединяют вакуумным шлангом с водоструйным или вакуумным насосом. Частицы, приставшие к стенкам мензурки и аппарата Олихова, смывают несколько раз водой на мембранный фильтр. Для промывки используют  $100 \text{ см}^3$  дистилли-

рованной воды. Фильтр с осадком высушивают, просасывая через него воздух в течении 3-5 минут.

При окончании фильтрации аппарат Олихова разбирают, фильтр вынимают пинцетом и помещают в чашку Петри. Фильтры с осадком в чашке подсушивают при комнатной температуре. Взвешивают.

### **Обработка результатов**

Содержание взвешенных веществ (С) мг/дм<sup>3</sup> 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, см<sup>3</sup>.

Содержание взвешенных веществ, вычисляют как среднее арифметическое значение двух определений, расхождение между которыми (сходимость метода) не должно превышать 10 %.

Результат округлять до целого числа.

### **Задание**

Определить концентрацию взвешенных частиц гравиметрическим методом.

Варианты исходных данных к практической работе № 1, 3

Номер варианта	Бассейн, месторождение	Марка	Расход топлива	Доля золы, уносимой газами из котла, а <sub>у</sub>	Потери тепла с уносом от механической неполноты сгорания топлива, q <sub>4</sub> %
1	Донецкий	д	25	0,8	0,02
2	Донецкий	г	25	0,8	0,02
3	Донецкий	ж	30	0,8	0,02
4	Донецкий	т	30	0,8	0,018
5	Донецкий	а	35	0,8	0,018
6	Кузнецкий	д	35	0,8	0,021
7	Кузнецкий	г	40	0,8	0,021
8	Кузнецкий	т	40	0,95	0,5
9	Кузнецкий	а	45	0,95	0,5
10	Днепровский	1б	45	0,95	1
11	Кизеловский	ж	50	0,95	1,5
12	Кизеловский	г	50	0,95	1,5
13	Канско-Ачинский, Ирша-Бородинское	2б	55	0,95	2
14	Канско-Ачинский, Назаровское	2б	55	0,95	2
15	Канско-Ачинский, Березовское	2б	60	0,8	0,02
16	Канско-Ачинский, Боготольское	1б	25	0,8	0,02
17	Канско-Ачинский, Большесырское	3б	25	0,8	0,02
18	Иркутский, Черемховское1	д	30	0,8	0,018
19	Иркутский, Азейское	3б	30	0,8	0,018
20	Партизанский	г	35	0,8	0,021
21	Партизанский	ж	35	0,8	0,021
22	Партизанский	т	40	0,95	0,5
23	Мазут		40	0,95	0,5
24	Мазут		45	0,95	1
25	Мазут		45	0,95	1,5



Варианты исходных данных к практической работе № 2

Номер варианта	Топливо	Марка	Расход топлива	Зольность
1	Мазут низкосернистый	40 или 100	25	0,03
2	Мазут низкосернистый	40 или 100	25	0,03
3	Мазут низкосернистый	40 или 100	30	0,05
4	Мазут низкосернистый	40 или 100	30	0,06
5	Мазут низкосернистый	40 или 100	35	0,03
6	Мазут низкосернистый	40 или 100	35	0,03
7	Мазут низкосернистый	40 или 100	40	0,05
8	Мазут малосернистый	40 или 100	40	0,06
9	Мазут малосернистый	40 или 100	45	0,04
10	Мазут малосернистый	40 или 100	45	0,03
11	Мазут малосернистый	40 или 100	50	0,05
12	Мазут малосернистый	40 или 100	50	0,06
13	Мазут сернистый	40 или 100	55	0,03
14	Мазут сернистый	40 или 100	55	0,04
15	Мазут сернистый	40 или 100	60	0,05
16	Мазут сернистый	40 или 100	25	0,06
17	Мазут сернистый	40 или 100	25	0,03
18	Мазут сернистый	40 или 100	30	0,04
19	Мазут сернистый	40 или 100	30	0,05
20	Мазут сернистый	40 или 100	35	0,06
21	Мазут высокосернистый	40 или 100	35	0,03
22	Мазут высокосернистый	40 или 100	40	0,04
23	Мазут высокосернистый	40 или 100	40	0,05
24	Мазут высокосернистый	40 или 100	45	0,06
25	Мазут высокосернистый	40 или 100	45	0,03

Исходные данные к практическим работам № 3, 6

Номер варианта	Бассейн, месторождение	Марка	Доля золы, уносимой газами из	Объем сухих газов, образующихся при полном сгорании 1 кг топлива, м <sup>3</sup> /кг	Номинальная нагрузка котла, Д <sub>нр</sub> , т/ч
1	Донецкий	д	1	6,35	210
2	Донецкий	г	1	7,01	120
3	Донецкий	ж	1	7,66	350
4	Донецкий	т	1	7,73	420
5	Донецкий	а	1	6,83	420
6	Кузнецкий	д	1	7,92	420
7	Кузнецкий	г	1	8,53	420
8	Кузнецкий	т	0,95	9,6	2000
9	Кузнецкий	а	0,95	8,97	2000
10	Днепровский	1б	0,95	3,82	2000
11	Кизеловский	ж	0,95	7,35	210
12	Кизеловский	г	0,95	6,18	210
13	Канско-Ачинский, Ирша-Бородинское	2б	0,95	5,74	210
14	Канско-Ачинский, Назаровское	2б	0,95	4,95	210
15	Канско-Ачинский, Березовское	2б	1	5,92	120
16	Канско-Ачинский, Боготольское	1б	1	4,58	120
17	Канско-Ачинский, Большесырское	3б	1	7,04	120
18	Иркутский, Черемховское 1	д	1	5,99	120
19	Иркутский, Азейское	3б	1	5,87	420
20	Партизанский	г	1	6,98	420
21	Партизанский	ж	1	7,38	420
22	Партизанский	т	0,95	8,05	420
23	Мазут		0,95	14,	420
24	Мазут		0,95	7,48	670
25	Мазут		0,95	3,25	670

## Исходные данные к практической работе № 4

Номер варианта	Щелочность воды в мокром золоуловителе, Щ <sub>0</sub> , мгэкв/кг	В, т/ч	Топливо	
			Бассейн, месторождение	Марка
1	0	25	Донецкий	Д
2	5	30	Донецкий	Г
3	10	33	Донецкий	Ж
4	0	40	Донецкий	Т
5	5	42	Донецкий	А
6	10	45	Кузнецкий	Д
7	0	50	Кузнецкий	Г
8	5	52	Кузнецкий	Т
9	10	54	Кузнецкий	А
10	0	56	Днепроровский	1Б
11	5	57	Кизеловский	Ж
12	10	58	Кизеловский	Г
13	0	59	Канско-Ачинский, Ирша-Бородинское	2Б
14	5	60	Канско-Ачинский, Назаровское	2Б
15	10	25	Канско-Ачинский, Березовское	2Б
16	0	30	Канско-Ачинский, Боготольское	1Б
17	5	30	Канско-Ачинский, Большесырское	3Б
18	10	33	Иркутский, Черемховское1	Д
19	0	40	Иркутский, Азейское	3Б
20	5	42	Партизанский	Г
21	10	45	Партизанский	Ж
22	0	50	Партизанский	Т
23	5	52	Мазут	Сернистый
24	10	54	Мазут	Малосернистый
25	0	56	Мазут	Высокосернистый

Исходные данные к практической работе № 5

Номер варианта	Номинальная нагрузка котла $D_{нр}$ , т/ч	В, т/ч	Бассейн, месторождение	Марка	Вид шлакоудаления	Доля воздуха, подаваемого помимо горелок	Потери тепла с уносом от мех. неполноты сгорания, %
1	210	25	Донецкий	Д	Т	0	0,4
2	120	30	Донецкий	Г	Т	0	0,4
3	350	33	Донецкий	Ж	Т	0	0,4
4	420	40	Донецкий	Т	Т	0	0,4
5	420	42	Донецкий	А	Т	0	0,4
6	420	45	Кузнецкий	Д	Т	0	0,4
7	420	50	Кузнецкий	Г	Т	0	0,4
8	2000	52	Кузнецкий	Т	Т	0	0,4
9	2000	54	Кузнецкий	А	Т	0	0,5
10	2000	56	Днепровский	1Б	Т	5	0,5
11	210	57	Кизеловский	Ж	Т	5	0,5
12	210	58	Кизеловский	Г	Т	5	0,5
13	210	59	Канско-Ачинский, Ирша-Бородинское	2Б	Ж	5	0,5
14	210	60	Канско-Ачинский, Назаровское	2Б	Ж	5	0,5
15	120	25	Канско-Ачинский, Березовское	2Б	Ж	5	0,5
16	120	30	Канско-Ачинский, Боготольское	1Б	Ж	10	0,6
17	120	30	Канско-Ачинский, Большесырское	3Б	Ж	10	0,6
18	120	33	Иркутск., Черемховск.	Д	Ж	15	0,6
19	420	40	Иркутск., Азейское	3Б	Ж	15	0,6
20	420	42	Партизанский	Г	Ж	15	0,6
21	420	45	Партизанский	Ж	Ж	15	0,6
22	420	50	Партизанский	Т	Ж	20	0,6
23	420	52	Мазут		Ж	20	0,6
24	670	54	Мазут		Ж	20	0,6
25	670	56	Мазут		Ж	20	0,6

Расчетные характеристики твердых и жидких топлив

Бассейн, месторождение	Марка	Класс	Состав рабочей массы топлива, %							Низшая теплота сгорания, МДж/кг
			W <sup>P</sup>	A <sup>P</sup>	S <sup>P</sup>	C <sup>P</sup>	H <sup>P</sup>	N <sup>P</sup>	O <sup>P</sup>	
Донецкий б-н	Д	Р	13,0	27,8	2,9	44,1	3,3	0,9	8,0	17,25
Донецкий б-н	Г	Р	10,0	28,4	3,0	48,3	3,4	0,9	5,6	18,92
Донецкий б-н	Ж	Р	6,0	30,1	2,5	53,4	3,3	1,0	3,7	21,14
Донецкий б-н	Т	Р	6,0	32,0	2,2	55,2	2,5	1,0	1,1	20,60
Донецкий б-н	А	СШ	8,5	34,8	1,5	52,2	1,0	0,5	1,5	18,23
Кузнецкий б-н	Д	Р, СШ	11,5	15,9	0,4	56,4	4,0	1,9	9,9	21,90
Кузнецкий б-н	Г	Р, СШ	8,5	16,9	0,4	60,1	4,2	2,0	7,9	23,57
Кузнецкий б-н	Т	Р, СШ	7,0	14,6	0,5	70,2	3,0	1,7	3,0	25,12
Кузнецкий б-н	А	Р	10,0	16,2	0,4	68,8	1,5	0,8	2,3	24,16
Днепроовский б-н	1Б	Р	54,0	16,6	1,9	19,5	1,7	0,2	6,1	6,38
Кизеловский б-н	Ж	Р	6,0	32,0	5,3	48,6	3,5	0,6	4,0	19,68
Кизеловский б-н	Г	Р, МСШ	7,5	37,9	4,3	41,5	3,2	0,5	5,1	16,71
Канско-Ачинский б-н, Ирша-Бородинское	2Б	Р	33,0	7,4	0,2	42,6	3,0	0,6	13,2	15,28
Канско-Ачинский б-н, Назаровское	2Б	Р	39,0	7,9	0,4	37,2	2,5	0,5	12,5	12,85
Канско-Ачинский б-н, Березовское	2Б	Р	33,0	4,7	0,2	44,2	3,1	0,4	14,4	15,66
Канско-Ачинский б-н, Боготольское	1Б	-	44,0	6,7	0,5	34,3	2,4	0,3	11,8	11,81
Канско-Ачинский б-н, Большесырское	3Б	-	24,0	6,1	0,2	51,7	3,6	0,6	13,8	19,05
Иркутский б-н, Черемховское	Д	Р, МСШ	15,0	29,8	0,9	42,5	3,1	0,6	8,1	16,41
Иркутский б-н, Азейское	3Б	Р	25,0	16,5	0,5	42,7	3,1	0,9	11,3	15,99
Партизанский б-н	Г	Р, СШ	5,5	34,0	0,4	49,8	3,2	0,8	6,3	19,47
Партизанский б-н	Ж	Р	5,5	32,1	0,4	52,7	3,2	0,7	5,4	20,52
Партизанский б-н	Т	Р	5,0	28,5	0,5	58,8	2,7	0,7	3,8	22,19
Печорский б-н, Интинское	Д	Р	11,5	28,8	2,5	44,2	2,9	1,5	8,6	16,87
Печорский б-н, Воркутинское	Ж	Р	8,0	29,4	1,0	52,6	3,3	1,5	4,2	20,77
Эстон-сланец	сланец	0-300 мм	12,0	44,4	1,4	19,9	2,6	0,1	2,9	9,00
Ленинград-сланец	сланец	0-300 мм	11,0	48,2	1,3	17,3	2,2	0,1	2,5	7,66
Кашпирское мес-ие	сланец	0-300 мм	14,0	58,9	2,4	10,9	1,4	0,3	3,8	4,60
Росторф (фрезторф)	торф	-	50,0	6,3	0,1	24,7	2,6	1,1	15,2	8,12
Мазут	40 или 100	низкосер нистый	0,15	0,03	0,39	87,33	11,90		0,20	41,68
Мазут	40 или 100	малосер нистый	0,20	0,03	0,85	86,58	12,04		0,30	40,53
Мазут	40 или 100	сернистый	0,49	0,05	1,80	85,71	11,45		0,50	39,57
Мазут	40 или 100	высокосер нистый	1,00	0,06	2,55	85,04	10,64		0,71	39,06

**Овсянник Наталья Владимировна**  
**Широглазова Наталья Владимировна**

## **ЭКОЛОГИЯ ЭНЕРГЕТИКИ**

### **Практикум**

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

Подписано к размещению в электронную библиотеку  
ГГТУ им. П. О. Сухого в качестве электронного  
учебно-методического документа 05.09.14.

Рег. № 76Е.

<http://www.gstu.by>