

Федеральное агентство по образованию РФ  
Государственное образовательное учреждение высшего  
профессионального образования  
Красноярский государственный технический университет

**Е.А. Бойко**

# **СНИЖЕНИЕ ВЫБРОСОВ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ И ТОКСИЧНЫХ ГАЗОВ ТЭС В АТМОСФЕРУ**

(учебное пособие)

Красноярск 2005

## Содержание

1. Учебная цель .....	
1.1. Концепция, принятые сокращения, основные термины .....	
2. Содержание учебного элемента .....	
2.1. Общие данные .....	
2.2. Выбросы тепловых электростанций в атмосферу и их влияние на окружающую среду .....	
2.2.1. Токсичные вещества в топливе и дымовых газах.....	
Зольность .....	
Сернистость.....	
2.3. Преобразование вредных выбросов ТЭС в атмосферном воздухе .....	
2.4. Влияние вредных выбросов электростанций на природу и человека .....	
2.5. Нормирование предельно допустимых выбросов (ПДВ) .....	
2.6. Улавливание твёрдых веществ из дымовых газов ТЭС.....	
2.6.1. Характеристики летучей золы. Основы теории золоулавливания.....	
2.6.2. Типы и характеристики золоуловителей .....	
2.6.3. Инерционные золоуловители .....	
2.6.4. Жалюзийные золоуловители .....	
2.6.5. Мокрые золоуловители .....	
2.6.7. Электрофильтры .....	
2.6.8. Краткие сведения об улавливании золы на мазутных ТЭС.....	
2.7. Основные пути снижения выбросов токсичных газов ТЭС .....	
2.7.1. Очистка дымовых газов от сернистых веществ.....	
2.8. Образование оксидов азота в топках котлов.....	
2.9. Методы снижения выбросов оксидов азота .....	
2.10. Краткие сведения о способах снижения выбросов других вредных веществ, содержащихся в дымовых газах котлов .....	
2.11. Рассеивание в атмосфере выбросов электростанций .....	
2.11.1. Дымовые трубы.....	
3. Резюме.....	
4. Контрольные вопросы .....	
5. Литература.....	

## 1. УЧЕБНАЯ ЦЕЛЬ

Основной задачей настоящего учебного пособия является ознакомление оперативного персонала с методами снижения отрицательного воздействия ТЭС на окружающую природную среду как техническими, так и экономическими методами (приёмами).

### 1.1. Концепция, принятые сокращения, основные термины

В пособии кратко освещены основные проблемы по улучшению качества окружающей среды при производстве электроэнергии и теплоты. Состояние воздушного и водного бассейнов территории района вблизи ТЭС зависит от вида используемого топлива и организации его сжигания, работы пылегазоулавливающих и водоочистных установок, устройств контроля, организации эксплуатации оборудования и других условий.

Поэтому машинисты паровых котлов должны не только иметь общие представления о важности мер по охране окружающей среды, но и уметь правильно действовать в случае аварийных ситуаций, обеспечить рациональную эксплуатацию оборудования и контроль за выбросами вредных веществ.

**ПДК** – предельно допустимая концентрация

**ПДВ** - предельно допустимый выброс

**ВСВ** – временно согласованный выброс

**ГО** – головная организация

**ГВО** – головная ведомственная организация

**МП** – мокропрутковый

**УЭС** – удельное электрическое сопротивление

**РВП** – регенеративный воздухоподогреватель

**ГЗУ** – гидрозолоудаление

**ПДС** предельно допустимый сброс

**ОПУ** – опытно промышленная установка

**Окружающая среда** – или «природная среда» - среда обитания человека вне производственных и жилых зданий.

**Биосфера** – взаимосвязь процессов, происходящих в минеральной, водной и газообразной оболочках Земли.

**Экология** – наука, занимающаяся проблемами взаимодействия человека, растительного и животного мира с биосферой.

**Оксиды** – класс химических соединений, объединяющий соединения элементов с кислородом со степенью окисления II.

**Дисперсность** – характеристика размеров частиц дисперсной фазы, выраженной либо величиной удельной поверхности, либо величиной, обратно пропорционально среднему диаметру частиц.

**Пентаоксид ванадия** -  $V_2O_5$  пятиокись ванадия.

**Бензапирекс** – конденсированный ароматический углеводород  $C_{20}H_{16}$ , содержащий пять ядер бензола и обладающий ярко выраженным канцерогенным действием.

**Адсорбция** – явление концентрирования вещества из объёма фаз на поверхности раздела фаз.

**Диссоциация** – распад кристалла, молекулы, радикала или иона на фрагменты, имеющие меньшую молекулярную массу.

**Фотохимическая Д** – диссоциация, протекающая при воздействии света.

## 2. СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОГО РАЗДЕЛА

### 2.1. Общие данные

Объективной реальностью мирового развития человеческого общества является возрастающее воздействие промышленности, транспорта и сельского хозяйства на природную (окружающую) среду.

Увеличение и накопление в окружающей среде различных загрязнений способны нарушить сложившиеся естественные процессы в биосфере.

Охрана природы представляет собой систему естественно-научных, производственно-технических, экономических и административно-правовых мероприятий, осуществляемых в стране и направленных на сохранение и контролируемое изменение окружающей природной среды в интересах развивающегося общества, обеспечение рационального использования природных ресурсов.

Велико ли влияние энергетики на окружающую среду?

Рост энерговооружённости труда и потребления электроэнергии в быту ведёт к дальнейшему развитию электроэнергетики, а, следовательно, к увеличению её влияния на окружающую среду и биосферу в целом.

На производство электроэнергии в нашей стране расходуется около 28% добываемого топлива, на производство теплоты – 46%, или в сумме на указанные цели почти  $\frac{3}{4}$  топливных ресурсов.

Участие энергетических предприятий (ТЭС и котельных) в загрязнении окружающей среды продуктами сгорания топлива, твёрдыми отходами и низкопотенциальным теплом значительно и хорошо видно на рис.1.

Наибольшую опасность для человека представляет загрязнение атмосферного воздуха в городах. Во многих из них концентрация вредных веществ превышает предельно-допустимые концентрации (ПДК).

В стране постоянно ведётся работа по организации рационального использования и воспроизводству природных ресурсов, снижению отрицательных последствий воздействия общества на окружающую природу.

В результате использования энергосберегающих технологий в промышленности ежегодно экономится  $250\text{км}^3$  (250 миллиардов  $\text{м}^3$ ) свежей воды, что в 4 раза больше годового стока реки Днепр. Во многих городах (Тверь, Кемерово и др.) удалось добиться улучшения состояния воздушного бассейна.

Создана широкая сеть заповедников, где проводится значительная научно-исследовательская работа и ознакомление широкой общественности с красотой и хрупкостью природы, методами её сохранения.

## Материальный баланс угольной ТЭС мощностью 2400МВт

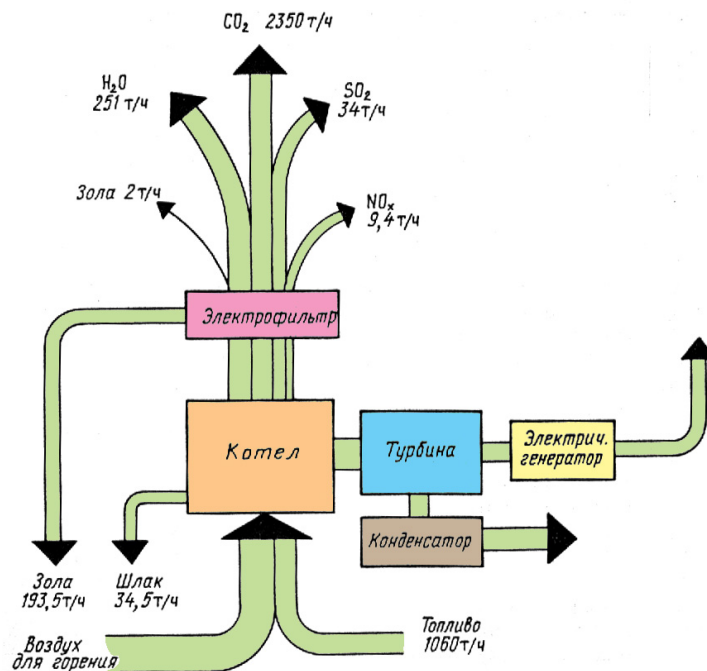


Рис. 1

«В интересах настоящего и будущего поколений в России принимаются необходимые меры для охраны и научно обоснованного, рационального использования Земли и её недр, водных ресурсов, растительного и животного мира, для сохранения в чистоте воздуха и воды, обеспечения воспроизводства природных богатств и улучшения окружающей человека среды» - так в главном Законе страны – Конституции Российской Федерации определена деятельность всех граждан и организаций в области охраны окружающей среды. Выполнение любых работ по строительству, монтажу, наладке, ремонту и эксплуатации энергетических установок должно осуществляться без нанесения ущерба окружающей человека природе.

В этом залог физического и духовного здоровья человека.

## 2.2. Выбросы тепловых электростанций в атмосферу и их влияние на окружающую среду

### 2.2.1. Токсичные вещества в топливе и дымовых газах

Токсичными (вредными) называются химические соединения, отрицательно влияющие на здоровье человека и животных. Вид топлива влияет на состав образующихся при его сжигании вредных веществ. На электростанциях используется твёрдое, жидкое и газообразное топливо.

Основными вредными веществами, содержащимися в дымовых газах котлов являются: оксиды (окислы) серы (SO<sub>2</sub> и SO<sub>3</sub>), оксиды азота (NO и NO<sub>2</sub>),

оксид углерода (СО), соединения ванадия (в основном пентаксид ванадия  $V_2O_5$ ). К вредным веществам относится также зола.

**Твёрдое топливо.** В теплоэнергетике используют угли (бурые, каменные, антрацитовый штыб), горючие сланцы и торф. Состав твёрдого топлива схематично представлен на рис. 2.

### Структура твёрдого топлива

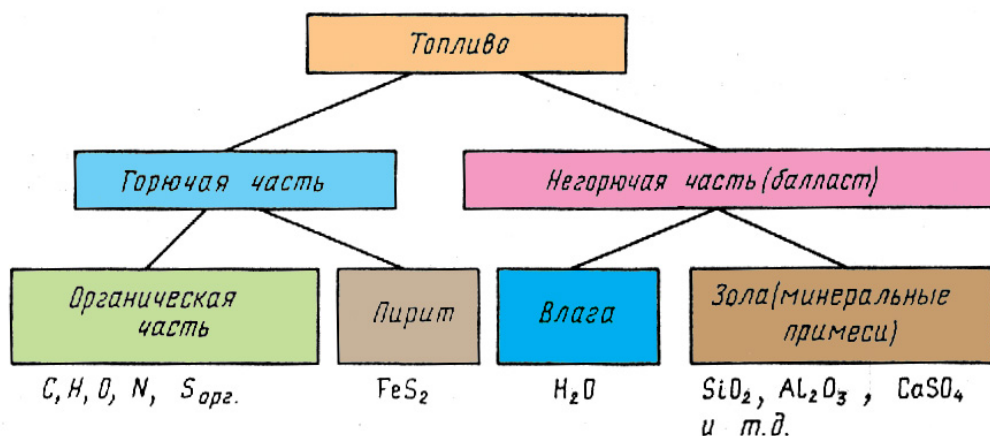


Рис. 2

Как видно из рис. 2, органическая часть топлива состоит из углерода С, водорода Н, кислорода О, органической серы  $S_{орг.}$ . В состав горючей части топлива ряда месторождений входит также неорганическая, ипритная сера  $FeS_2$ .

Негорючая (минеральная) часть топлива состоит из влаги W и золы А. Основная часть минеральной составляющей топлива переходит в процессе сжигания в летучую золу, уносимую дымовыми газами. Другая часть в зависимости от конструкции топки и физических особенностей минеральной составляющей топлива может превращаться в шлак.

Зольность отечественных углей колеблется в широких пределах (10÷55%). Соответственно изменяется и запылённость дымовых газов, достигающая для высокозольных углей 60÷70г/м<sup>3</sup>.

Одной из важнейших особенностей золы является то, что частицы её имеют различные размеры, которые находятся в диапазоне от 1–2 до 60мкм и более. Эта особенность как параметр, характеризующий золу, называется дисперсностью.

Химический состав золы достаточно разнообразны. Обычно зола состоит из оксидов кремния, алюминия, титана, натрия, железа, кальция, магния. Кальций в золе может присутствовать в виде свободного оксида, а также в составе силикатов, сульфатов и других соединений.

Более детальные анализы минеральной части твёрдых топлив показывают, что в золе в небольших количествах могут быть и другие элементы, например, германий, бор, мышьяк, ванадий, марганец, цинк, уран, серебро, ртуть, фтор, хлор. Микро примеси перечисленных элементов распределяются

в различных по размерам частиц фракциях летучей золы неравномерно, и обычно их содержание увеличивается с уменьшением размеров этих частиц.

**Твёрдое топливо** может содержать серу в следующих формах: колчедана  $\text{Fe}_2\text{S}$  и пирита  $\text{FeS}_2$  в составе молекул органической части топлива и в виде сульфатов в минеральной части. Соединения серы в результате горения превращаются в оксиды серы, причём около 99% составляет сернистый ангидрид  $\text{SO}_2$ .

Сернистость углей в зависимости от месторождения составляет 0,3÷6%. Сернистость горючих сланцев достигает 1,4÷1,7%, торфа – 0,1%.

Соединения ртути, фтора и хлора находятся за котлом в газообразном состоянии.

В составе золы твёрдых видов топлива могут присутствовать радиоактивные изотопы калия, урана и бария. Эти выбросы практически не влияют на радиационную обстановку в районе ТЭС, хотя их общее количество может превышать выбросы радиоактивных аэрозолей АЭС той же мощности.

**Жидкое топливо.** В теплоэнергетике применяются мазут, сланцевое масло, дизельное и котельно-печное топливо. В жидком топливе отсутствует пиритная сера. В состав золы мазута входят пентаоксид ванадия ( $\text{V}_2\text{O}_5$ ), а также  $\text{Ni}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MgO}$  и другие оксиды.

Зольность мазута не превышает 0,3%. При полном его сгорании содержание твёрдых частиц в дымовых газах составляет около  $0,1\text{г}/\text{м}^3$ , однако это значение резко возрастает в период очистки поверхностей нагрева котлов от наружных отложений.

Сера в мазуте находится преимущественно в виде органических соединений, элементарной серы и сероводорода. Её содержание зависит от сернистости нефти, из которой он получен.

Топочные мазуты в зависимости от содержания в них серы подразделяются на: малосернистые  $\text{SP}<0,5\%$ , сернистые  $\text{SP}=0,5\div 2\%$  и высокосернистые  $\text{SP}>2\%$ .

Дизельное топливо по содержанию серы делится на две группы: первая – до 0,2% и вторая – до 0,5%. В малосернистом котельно-печном топливе содержится серы не более 0,5, в сернистом – до 1,1, в сланцевом масле – не более 1,0%.

**Газообразное топливо** представляет собой наиболее «чистое» органическое топливо, так как при его полном сгорании из токсических веществ образуются только оксиды азота.

Ниже изложены методики расчёта выброса вредных веществ энергетическими котлами.

**Зола.** При расчёте выброса твёрдых частиц в атмосферу необходимо учитывать, что вместе с золой в атмосферу поступает несгоревшее топливо (недожог). Общее количество золы, уносимое с дымовыми газами, на 1 кг сожжённого топлива с учётом недожога составляет, кг/кг:

$$g = \alpha_{\text{ун}} \cdot \frac{A^p}{100} \left( 1 + \frac{\Gamma_{\text{ун}}}{100 - \Gamma_{\text{ун}}} \right), \quad (1)$$

где  $A^p$  – зольность топлива на рабочую массу, % ;

$\alpha_{\text{ун}}$  – доля твёрдых частиц, уносимых из топки с дымовыми газами;

$\Gamma_{\text{ун}}$  – содержание горючих в золе уноса, %.

Механический недожога  $q_1$  для камерных топок, если принять одинаковым содержание горючих в шлаке и уносе, можно определить по выражению:

$$\frac{q_1}{100} = \frac{\Gamma_{\text{ун}}}{100 - \Gamma_{\text{ун}}} = \frac{32,7}{Q_n^p} \cdot \frac{A^p}{100}, \quad (2)$$

где  $Q_n^p$  – низшая теплота сгорания рабочего топлива, МДж/кг

32,7 МДж/кг – средняя теплота сгорания горючих в уносе.

Подставив отношение  $\Gamma_{\text{ун}}/(100-\Gamma_{\text{ун}})$  из выражения (2) в формулу (1), получим количество золы в уносе на 1кг топлива с учётом недожога:

$$g = \alpha_{\text{ун}} \cdot \left( A^p + q_1 \frac{Q_n^p}{32,7} \right). \quad (3)$$

в связи с тем, что все виды топлива имеют разную теплоту сгорания, в расчётах часто используют приведённые зольность  $A_{\text{пр}}$  и сернистость  $S_{\text{пр}}$  определяемые по выражениям :

$$A_{\text{пр}} = \frac{10^3 \cdot A^p}{Q_n^p}; \quad S_{\text{пр}} = \frac{10^3 \cdot S^p}{Q_n^p}. \quad (4)$$

Характеристики некоторых видов топлива приведены в табл.1.

Выброс золы в атмосферу в единицу времени (г/сек, т/год) с учётом улавливания её в золоуловителе определяется по формуле:

$$M_3 = B \frac{A^p}{100 - \Gamma_{\text{ун}}} a_{\text{ун}} (1 - \eta_3), \quad (5)$$

где  $B$  – расход натурального топлива за рассматриваемый период (г/сек, т/год);  $\eta_3$  – степень улавливания твёрдых частиц в золоуловителях.

Доля твёрдых частиц  $\alpha_{\text{ун}}$ , уносимых из топки, зависит от типа топки и может быть принята по следующим данным:

Камеры с твёрдым шлакоудалением.....	0,95
Открытые с жидким шлакоудалением.....	0,7 - 0,85
Полуоткрытые с жидким шлакоудалением.....	0,6 – 0,8
Двухкамерные топки.....	0,5 – 0,6
Топки с вертикальными предтопками.....	0,2 – 0,4
Горизонтальные циклонные топки.....	0,1 – 0,15



## Характеристики некоторых топлив

Месторождение, бассейн	Марка угля, класс	Теплота сгорания $Q_n^p$ , МДж/кг	Зольность		Сернистость	
			рабочая $A^p$ , %	приведённая $A_{пр}$ , % · кг/МДж	рабочая, $S^p$ , %	приведённая $S_{пр}$ , % · кг/МДж
Донецкий	А, Ш	22,58	22,9	1,014	1,7	0,075
Кузнецкий	Д, Р	22,84	13,2	0,578	0,3	0,013
Карагандинский	К	16,26	27,6	1,697	0,8	0,049
Экибастузский	СС, Р	16,76	38,1	2,273	0,8	0,048
Подмосковный	Б2, Р	10,43	25,2	2,416	2,7	0,259
Канско-Ачинский (Березовский)	Б2, Р	15,67	4,7	0,300	0,2	0,013
Сланцы эстонские	-	10,94	40,0	3,656	1,6	0,146
Торф фрезерный	-	8,13	6,3	0,775	0,1	0,012
Мазут	Мало-сернистый	40,40	0,05	-	0,3	-
	Сернистый	39,86	0,1	-	1,4	-
	Высоко-сернистый	38,89	0,1	-	2,8	-

Из табл.1 видно, что наибольшую зольность имеют горючие сланцы и бурые угли, а также экибастузский каменный уголь.

При отсутствии эксплуатационных данных по содержанию горючих в уносе количество выбрасываемой золы рассчитывается по формуле:

$$M_3 = 0,01B(\alpha_{yH} \cdot A^p + q_4^{yn} \cdot Q_n^p / 32680) \cdot (1 - \eta_3), \quad (6)$$

где  $q_4^{yn}$  - потери теплоты с уносом от механической неполноты сгорания топлива %.

**Оксиды серы.** Выброс оксидов серы определяется по сернистому ангидриду, г/сек(т/год):

$$M_{SO_2} = 2 \cdot 10^3 \frac{S^p}{100} B(1 - \eta_{SO_2}^I) \cdot (1 - \eta_{SO_2}^{II}), \quad (7)$$

где  $\eta_{SO_2}^I$  - доля оксидов серы, связываемых летучей золой в газоходах котла;  $\eta_{SO_2}^{II}$  - доля оксидов серы, улавливаемых в золоуловителе коэффициент 2 в формуле (7) учитывает отношение молекулярных масс  $SO_2(64)$  и  $S(32)$ .

Как показали исследования, связывание сернистого ангидрида летучей золой в газоходах энергетических котлов зависит в основном от содержания оксида кальция в рабочей массе топлива. Это хорошо видно на рис. 3.

**Коэффициент связывания сернистого ангидрида летучей золой в газоходах энергетических котлов при пылевидном сжигании и сухом шлакоудалении в зависимости от содержания в золе оксида кальция и серосодержания топлива**

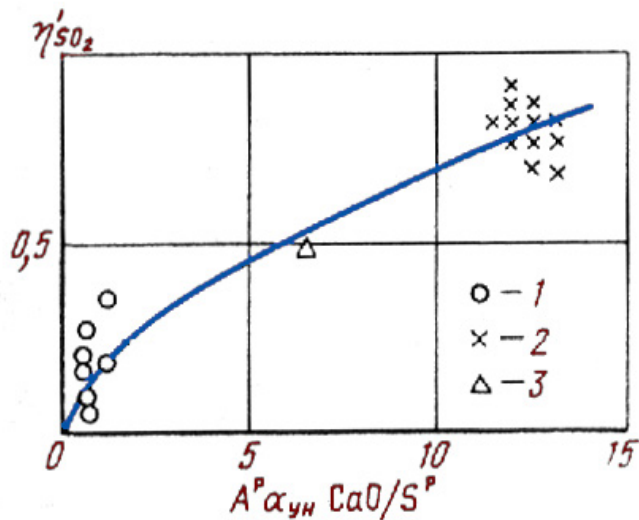


Рис. 3

1 – ангренский уголь; 2 – эстонский сланец; 3 – берёзовский уголь

**Степень улавливания оксидов серы в мокрых золоуловителях  $\eta''_{SO_2}$ , в зависимости от приведённой сернистости топлива  $S^{np}$**

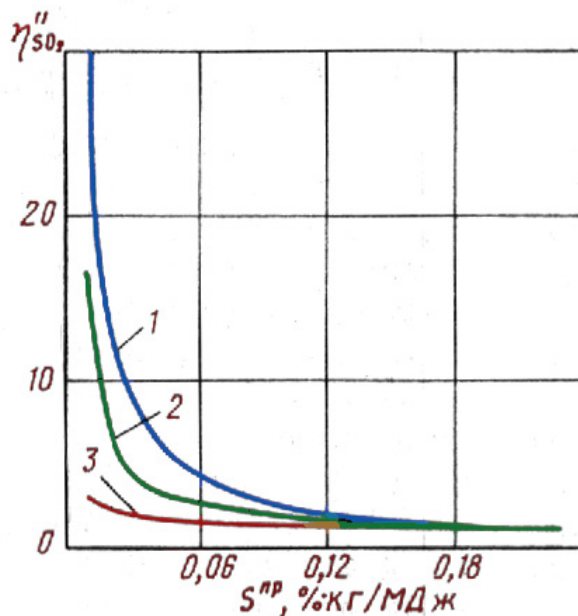


Рис. 4

1 – 3 – щёлочность орошаемой воды соответственно 10, 5, 0 мг-экв/л

**Для получения полноценной версии необходимо обращаться по адресу...**



«Лаборатория информационных технологий в энергетике»,  
Кафедра «Тепловые электрические станции»  
Красноярского государственного технического университета  
e-mail: [boiko@krgtu.ru](mailto:boiko@krgtu.ru)  
р.т.: (8-3912) 49-72-99, 49-74-63  
660074, г. Красноярск, ул. Академика Киренского, 26  
Красноярский государственный технический университет