

Национальный исследовательский
Томский политехнический университет

Кафедра теоретической и
промышленной теплотехники

Лекции по курсу:
«Природоохранные технологии в промышленной
теплоэнергетике»

Разработчик: к.т.н., Разва А.С.

Томск 2010

Улавливание твердых веществ из дымовых газов

1. Характеристики летучей золы. Основы теории золоулавливания

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

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

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

Эффективность работы газоочистных устройств во многом зависит от физико-химических свойств улавливаемой золы и поступающих в золоуловитель дымовых газов. Основными характеристиками золы являются плотность, дисперсный состав, электрическое сопротивление (для электрофильтров), слипаемость.

Плотность частиц летучей золы для большинства углей лежит в пределах $1900...2500\text{ кг/м}^3$. Плотность определяется как отношение массы частиц золы к занимаемому ею объему, включая объемы пор и газовых включений.

Для выбора и расчета золоуловителей большое значение имеет распределение частиц по размерам - дисперсный состав. О частицах судят по размеру наименьшего отверстия сита, через которое частица диаметром d проходит при просеивании. Просеивая золу через ряд сит с различным размером ячеек, получают кривую остатков на сите R_d (рис.1, а).

Ордината кривой (вертикальная ось) показывает количество пыли в процентах, частицы которых больше, чем размер ячейки сита. Можно вместо остатков на сите использовать обратную величину - проход через сито y_d , причем

$$y_d = 100 - R_d.$$

Наименьший размер отверстий в ситах, принятых в России, составляет 44 мкм , поэтому для определения дисперсного состава фракций меньше этого размера, представляющих наибольшие трудности при золоулавливании, используются другие методы - воздушной сепарации, жидкостной седиментации (всплывание или оседание частиц) и микроскопического анализа.

Расчет степени улавливания обычно ведется для каждой фракции частиц отдельно. Содержание той или иной фракции Φ_i можно найти из кривой остатков на сите вычитанием остатков на сите на концах заданного изменения диаметров частиц (рис.1, б). При расчете золоуловителей диаметр принимают постоянным, равным среднеарифметическому диаметру на его концах. Так, в диапазоне изменения диаметров от 10 до 20 мкм в расчетах принимают в качестве среднего значения 15 мкм . В табл. 1 приведен фракционный состав золы уноса некоторых топлив.

Фракционный состав золы уноса некоторых топлив, %

Таблица 1

Месторождение, бассейн	Марка топлива	Тип мель- ницы	Размер частиц*, мкм								
			<u>0...5</u> 2,5	<u>5...10</u> 7,5	<u>10...20</u> 15	<u>20...30</u> 25	<u>30...40</u> 35	<u>40...60</u> 50	<u>60...80</u> 70	<u>80...100</u> 90	>100
Донецкий	АШ	ШБМ	8	9	14	11	11	20	17	5	5
Донецкий	Т	ШБМ	12	20	31	11	7	8	6	2	3
Кузнецкий	Т	ШБМ	12	19	31	9	6	10	5	3	5
Кемеровское	Т	ШБМ	8	13	22	17	10	14	8	3	5
Экибастузский	СС	ШБМ	6	9	46	21	8,3	6,7	-	-	-
Экибастузский	СС	ШБМ	9,5	15,5	20	11	7,5	9,5	-	-	-
Челябинский	Б	ШБМ	6,5	11,5	20	16	9	8	16	4	9
Подмосковный	Б	Быстрох.	24	21	16,5	10,2	8,5	9	6,5	1,8	2,5
Подмосковный	Б	ШБМ	11	18	22	14	18	12	8,1	2,1	2
Подмосковный	Б	ММТ	5	15	23	16,5	10	12,5	4	4	10
Канско-Ачинский	Б	ММТ	4	8	22	19	10	19	8	3	7
Фрезерный торф	-	ММТ	12	11	11	10	9	13	9	3	22

*) В числителе – предельные значения, в знаменателе – средний размер.

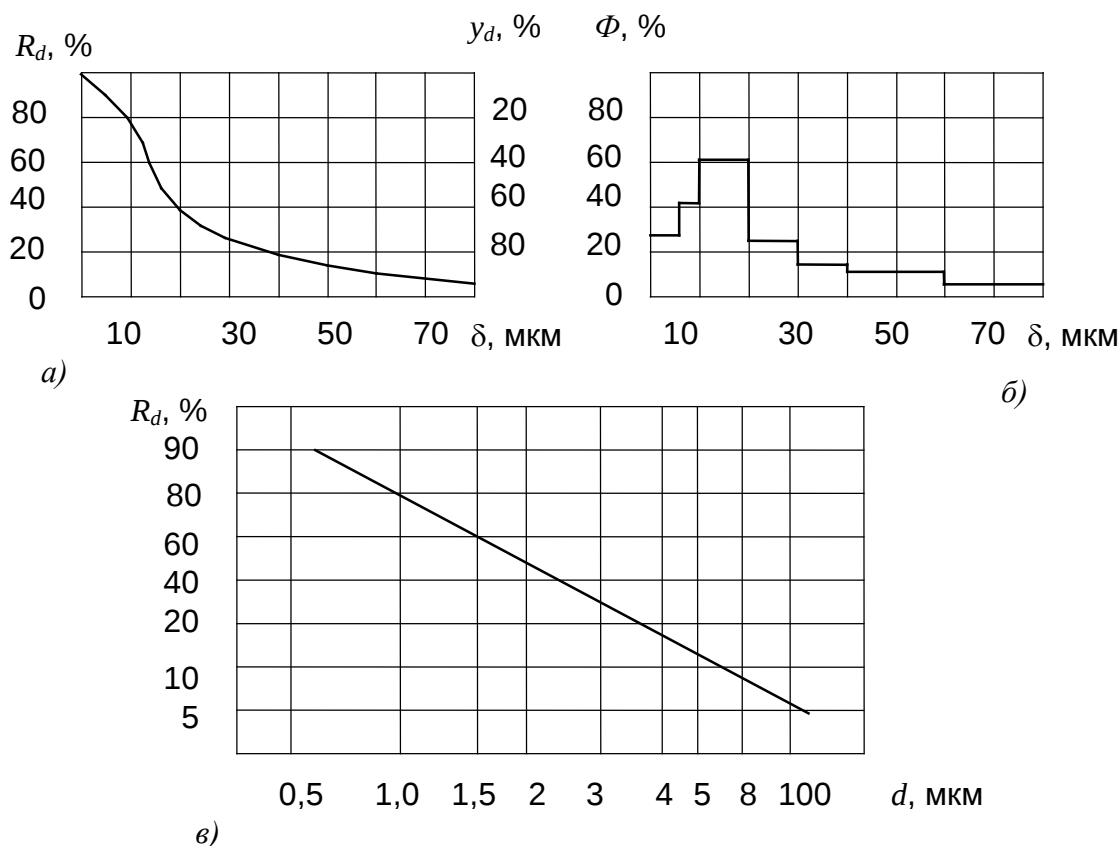


Рис.1. Дисперсионный состав золы уноса:

а – кривая остатков на сите; б – остатки на сите в вероятностно-логарифмической шкале координат; в – распределение частиц по фракциям

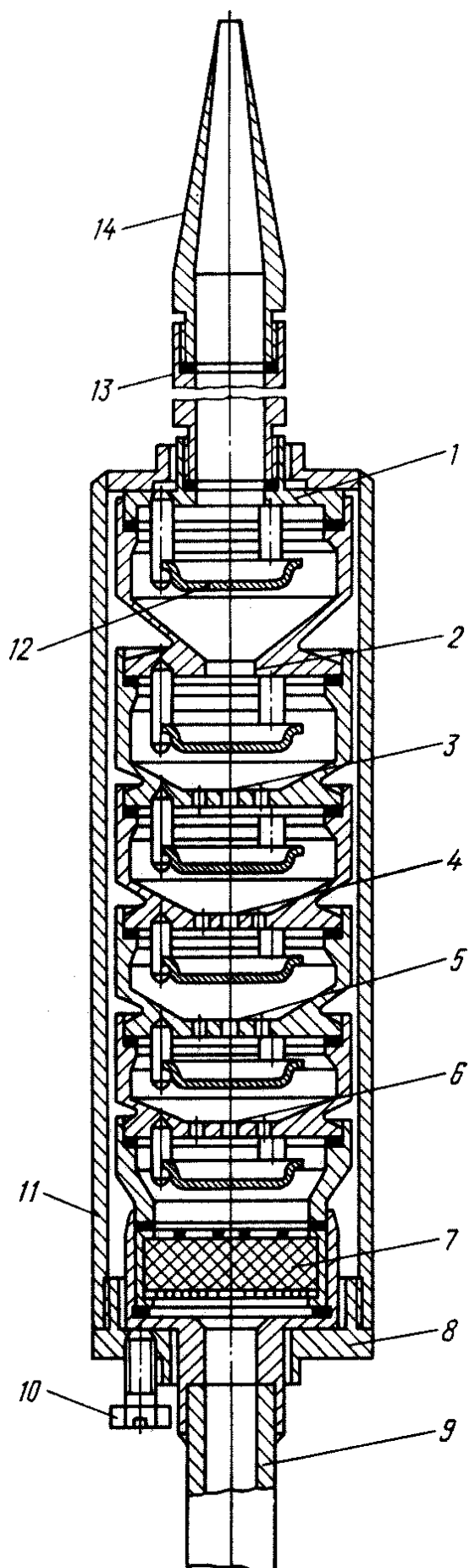
Дисперсный состав летучей золы во многом зависит от дисперсионного состава сжигаемой угольной пыли, поступающей после размольного устройства в топку.

Распределение частиц золы большинства углей соответствует логарифмическому закону. В этом случае зависимость R_d и d в специальной вероятностно-логарифмической шкале изображается прямой (рис.1, в), а все распределение частиц по фракциям можно характеризовать двумя величинами: d_{50} - медианным диаметром, который соответствует остатку на сите $R_d = 50\%$, и средним квадратичным отклонением

$$\sigma = d_{50} / d_{15,9} = d_{84,1} / d_{50},$$

где $d_{15,9}$; d_{50} ; $d_{84,1}$ - диаметры частиц, которые соответствуют остаткам на ситах, равным 15,9; 50 и 84,1%.

Для определения дисперсного состава золы используют специальные устройства - импакторы. В настоящее время данные дисперсионных анализов получают в основном с помощью каскадных импакторов. Принцип действия каскадных импакторов (рис.2) основан на инерционной сепарации частиц по размерам при пропускании пробы газа через ряд последовательно установленных сопел или сопловых решеток с расположенными под ними осадительными поверхностями (подложками). Диаметры одиночных сопел или диаметры и число сопел в сопловых решетках подбираются таким образом, чтобы размеры частиц,



которые могут осесть в данном каскаде, были меньше размеров частиц, способных осесть в предыдущем. Таким образом, анализируемые частицы оказываются разделенными на фракции, число которых равно общему числу каскадов импактора, включая фильтр.

Для очистки газов в электрофильтрах существенное влияние на эффективность их работы оказывает удельное электрическое сопротивление ρ . По этому признаку золу углей можно разделить на три группы.

- *I группа* характеризуется $\rho < 10^2$ Ом·м. Такими свойствами обладает зола, имеющая большое количество недогоревшего углерода, например зола донецкого АШ. Эта зола называется “низкоомной”.
- *II группа* золы имеет электрическое сопротивление в пределах $10^2 < \rho < 10^8$ Ом·м и наиболее полно улавливается в электрофильтрах. К этой группе относится зола ряда каменных углей - донецкого Т, ГСШ и др.
- *III группа* золы характеризуется $\rho > 10^8$ Ом·м и является электрическим изолятором. Такая зола называется “высокоомной”. К золе третьей группы относится зола некоторых каменных углей, в частности экибастузского, кузнецкого и др.

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

Рис.2. Импактор со сменными подложками (модели НИИОГАЗ):

1 и 2 – одиночные сопла; 3–6 – сопловые решетки; 7 – фильтр; 8 – крышка; 9 – отсосная труба; 10 – поджимной болт; 11 – корпус; 12 – сменная тарельчатая подложка; 13 – пробоотборный носик со сменным наконечником; 14 – сменный наконечник

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

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

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

Интенсивность абразивного износа золоуловителей зависит от твердости, размера, формы и плотности частиц. Абразивность золы характеризуется коэффициентом a , который определяет утонение стенки поперечно обтекаемой трубы из стали 20 в местах ее максимального износа при концентрации частиц 1 г/м^3 и скорости потока 1 м/с , при равномерном распределении поля скоростей и концентраций, при комнатной температуре в течение 1 ч. Значения коэффициента приводятся ниже в табл.2.

Значения коэффициента a

Таблица 2

Уголь	$a \cdot 10^9$
Донецкий	5,4
Подмосковный	5,4
Челябинский	4
Кизеловский	3,5
Богословский	2,2
Волжские сланцы	3
Экибастузский	8,8
Куучекинский	6,9
Черемховский	1,83

Смачиваемость частиц водой оказывает влияние на работу мокрых золоуловителей. Чем лучше смачиваемость, тем выше эффективность золоулавливания.

Основным показателем работы золоуловителя является степень улавливания золы:

$$\eta = \frac{G_{BX} - G_{BBLX}}{G_{BX}} = \frac{C_{BX} - C_{BBLX}}{C_{BX}},$$

где G_{BX} - количество золы, поступающей в золоуловитель в единицу времени, кг/с;

G_{BBLX} - количество выходящей (не уловленной) из золоуловителя в единицу времени золы, кг/с;

C_{BX} - концентрация золы в газе на входе в золоуловитель, кг/м³;

C_{BBLX} - то же на выходе, кг/м³.

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

$$\varepsilon = \frac{G_{BBLX}}{G_{BX}} = \frac{C_{BBLX}}{C_{BX}}.$$

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

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

Вместе с тем в теории золоулавливания используется параметр золоулавливания Π :

$$\Pi = \frac{gA}{V},$$

где g - скорость дрейфа частиц, м/с (скорость движения частиц золы под действием сил осаждения);

A - площадь поверхности канала золоулавливания, м²;

V - расход газа, м³/с.

Ниже предлагается рассмотрение двух предельных случаев движения частиц в потоке.

Если поток газов движется турбулентно, а частицы достаточно мелкие (менее 30 мкм) и активно участвуют в турбулентных пульсациях потока, то с известным допущением можно принять, что концентрация частиц у поверхности мало отличается от средней концентрации в рассматриваемом сечении золоуловителя. В этом случае выражение для определения степени проскока имеет вид

$$\varepsilon = \frac{C_{\text{БЫХ}}}{C_{\text{ВХ}}} = \exp(-\Pi).$$

В табл. 3 приведена зависимость между параметром золоулавливания Π и степенью уноса ε .

**Зависимость проскока (степени уноса ε) золы
через золоуловитель от параметра Π**

Таблица 3

Пара- метр Π	Параметр Π									
	,0	,1	,2	,3	,4	,5	,6	,7	,8	,9
0,	1,0000	0,9048	0,8187	0,7408	0,6703	0,6065	0,5488	0,4966	0,4493	0,4066
1,	0,3679	,3329	,3012	,2725	,2466	,2231	,2019	,1827	,1653	,1496
2,	,1353	,1225	,1100	,1003	,0907	,0821	,0743	,0672	,0608	,0550
3,	,0498	,0450	,0407	,0369	,0334	,0302	,0273	,0247	,0224	,0202
4,	,0183	,0166	,0150	,0136	,0123	,0111	,0100	,00910	,00823	,00745
5,	,00674	,00610	,00552	,00500	,00452	,00409	,00370	,00335	,00303	,00274
6,	,00248	,00224	,00203	,00184	,00166	,00150	,00136	,00123	,00111	,00100
7,	,00091	,00082	,00075	,00068	,00061	,00055	,00050	,00045	,00041	,00037
8,	,00033	,00030	,00027	,00025	,00022	,00020	,00018	,00017	,00015	,00014
9,	,00012	,00011	,00010	,00009	,00008	,00007	,00006	,00006	,00005	,00004

Другим предельным случаем является случай, когда частицы не пульсируют в потоке и каждая движется по соответствующим линиям тока. Это имеет место, если поток движется ламинарно или частицы настолько крупны, что практически не участвуют в пульсациях потока. Последнее имеет место при размерах частиц, имеющих $d_2 \gg 30$ мкм. В этом случае даже при турбулентном потоке газов частицы практически не пульсируют.

В этом случае

$$\varepsilon = 1 - \Pi; \quad \eta = \Pi$$

На рис.3 представлены кривые изменения степени улавливания при ро-

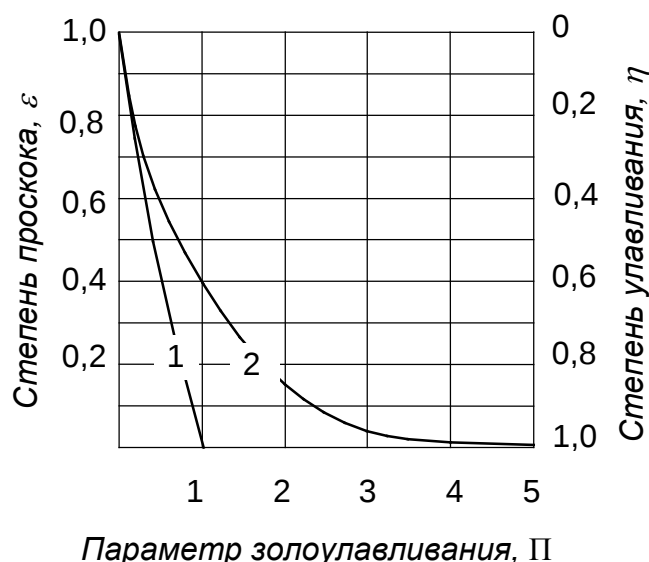


Рис.3. Зависимость степени проскока и улавливания от параметра золоулавливания:
1 – для крупных частиц (>30 мкм); 2 – для мелких частиц (<10 мкм)

щаемого газа:

$$f=A/V,$$

тогда параметру золоулавливания можно придать следующий вид, используемый при расчете электрофильтров:

$$\Pi = \mathcal{G}f.$$

Заменив секундный объем газов выражением

$$V=u \cdot F_r,$$

где u - скорость газа в сечении золоуловителя, м/с;

F_r - площадь поперечного сечения для прохода газа, м²,

параметр золоулавливания можно представить в виде произведения двух безразмерных параметров:

$$\Pi = \Phi K,$$

где $\Phi = A/F_r$ - геометрический параметр (параметр формы) золоуловителя, представляющий собой отношение поверхности осаждения к поперечному сечению для прохода газов;

$K = \mathcal{G}/u$ - кинематический параметр, являющийся отношением скорости дрейфа частиц золы на поверхность осаждения к средней скорости потока газов в золоуловителе.

Степень улавливания золоуловителя оказывается тем выше, чем больше произведение этих параметров. При этом следует иметь в виду, что кинематический параметр определяется характером сил, действующих на частицу, размерами частиц, физическими свойствами частиц и газов и аэродинамическими характеристиками потока.

Приведенные выше общие соотношения для степени улавливания в золоуловителях выведены при следующих условиях:

сте Π . Из рисунка видно, что улавливание крупных частиц золы (отсутствие пульсаций) идет более интенсивно и полностью заканчивается при $\Pi=1$. Для мелких частиц (турбулентная пульсация) улавливание идет менее интенсивно и полная очистка газов от золовых частиц происходит при $\Pi=\infty$.

Во всех случаях степень улавливания возрастает с ростом параметра золоулавливания Π . Как следует из выражения, определяющего Π , параметр золоулавливания возрастает с увеличением скорости дрейфа, поверхности осаждения и уменьшается с увеличением расхода очищаемого газа.

Если ввести понятие удельной площади поверхности осаждения на 1 м³/с очи-

- каждая частица золы, достигнув осаждающей поверхности, не может возвратиться обратно в поток (отсутствует вторичный унос);
- все частицы имеют одинаковую скорость осаждения (дрейфа);
- распределение скоростей газа по сечению потока является равномерным.

Теоретических формул, которые бы полностью учитывали все перечисленные допущения, не существует, поэтому при реальных расчетах золоуловителей приходится вводить эмпирические поправки, особенно это относится ко вторичному уносу.

2. Типы и характеристики золоуловителей

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

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

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

На ТЭС применяются три типа золоуловителей:

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

Фильтры, в которых используются пористые среды для очистки газов от твердых частиц (волокнистые, тканевые или рукавные, зернистые), не нашли широкого распространения из-за очень больших габаритов и повышенной сложности в эксплуатации. Основная сложность заключается в накоплении золы в фильтрующем материале, что требует его периодической регенерации. Основное достоинство таких фильтров заключается в очень высокой степени очистки газов от пыли или золы, превышающей 99,9%.

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

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

При выборе типа золоуловителя следует сделать наброски возможных схем газоочистки и провести варианты расчеты для выбора оптимальной из них по ожидаемой эффективности, капитальным и эксплуатационным затратам, компоновке оборудования и т. д.

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

Решение об установке золоуловителей внутри или вне зданий принимается в зависимости от климатических условий и типа аппаратов. Наиболее

сложные по конструкционному оформлению газоочистные аппараты - электрофильтры - устанавливаются вне зданий. Для защиты изоляторных коробок от осадков и облегчения условий их обслуживания верх электрофильтра закрывается шатром или специальной кровлей. Подбункерное пространство электрофильтров также укрывается легкими материалами.

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

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

3. Инерционные золоуловители (расчет инерционных золоуловителей)

В качестве инерционных (механических) золоуловителей наибольшее распространение получили циклоны, в которых осаждение твердых частиц происходит за счет центробежных сил при вращательном движении потока. Поступающий тангенциально через входной патрубок (рис.4, а) газ движется в канале, образованном наружной и внутренней цилиндрическими поверхностями циклона, где под действием центробежных сил происходит отделение пыли. Затем очищенный газ удаляется через внутренний цилиндр вверх, а осевшая на наружной стенке зола ссыпается под действием силы тяжести вниз в коническую воронку и далее в общий бункер.

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

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

где ρ — плотность частицы, кг/м³.

Движению частицы к поверхности осаждения препятствует сила лобового сопротивления F_C , которая для частиц в диапазоне диаметров от 2 до 50 мкм определяется по закону Стокса:

$$F_C = 3 \cdot \pi \cdot \mu \cdot d \cdot g,$$

где μ - динамическая вязкость газа, Па·с.

Приравнявая выражения для F и F_C , определяется скорость дрейфа частицы к поверхности осаждения:

$$g = \frac{\tau_\rho u^2}{R},$$

где $\tau_\rho = \frac{\rho d^3}{18\mu}$ - время релаксации, с.

Временем релаксации называется время разгона частицы от нулевого до заданного значения скорости (в данном случае до скорости дрейфа g) при постоянном значении ускорения a (в рассматриваемом случае $a = u^2/R$). Время

определяется размером частиц и физическими свойствами частицы и среды.

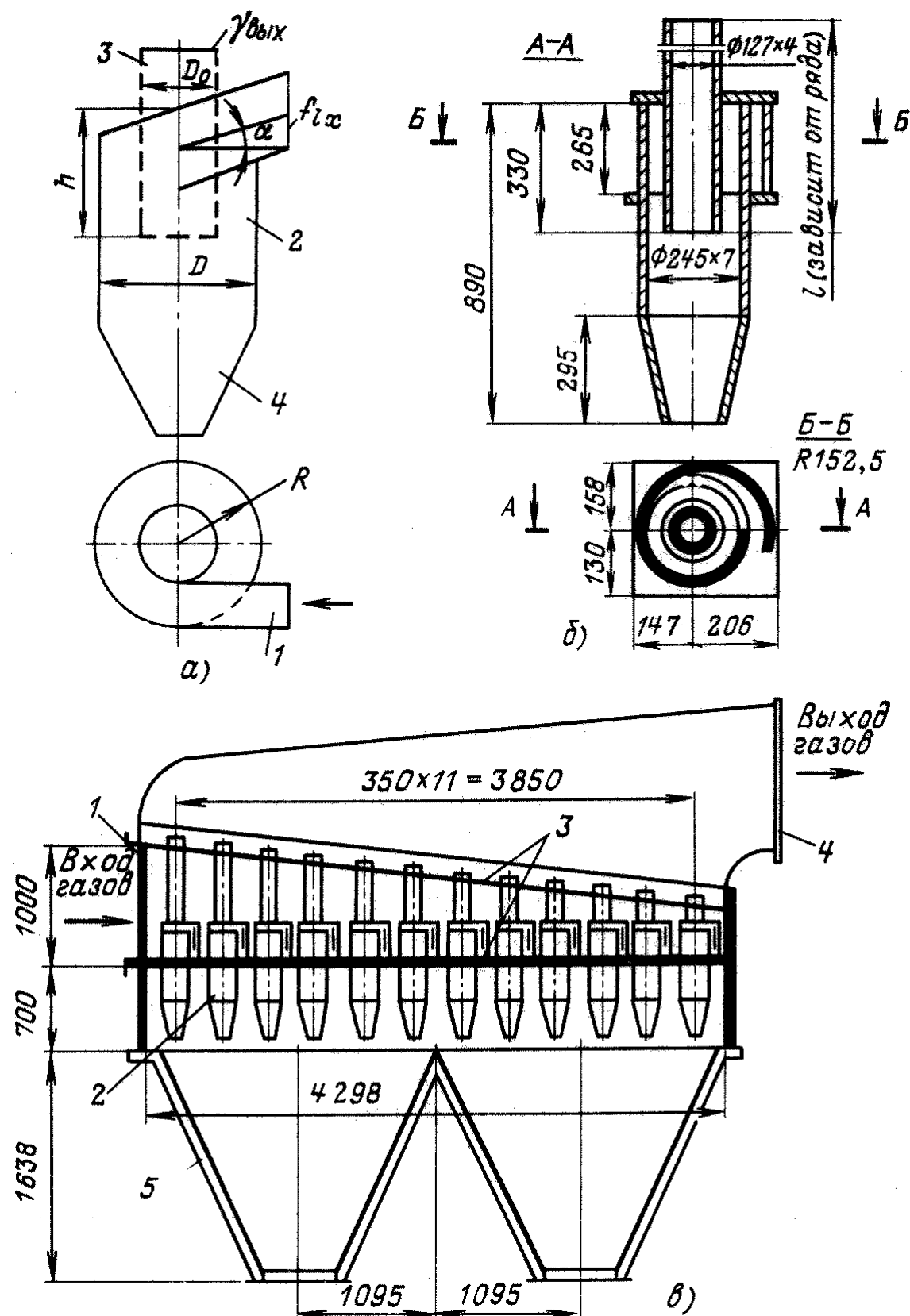


Рис.4. Циклонные золоуловители:

а – принципиальная схема циклона; б – элемент батарейного циклона БЦУ типа “Энергоуголь”; в – батарейный циклон; 1 – входной патрубок запыленного газа; 2 – циклонный элемент; 3 – трубные доски; 4 – выходной патрубок очищенного газа; 5 – бункер для золы

Кинематический параметр для циклонных золоуловителей принимает вид

$$K = \frac{g}{u} = \frac{\tau_p u}{R}.$$

Параметр формы определяется исходя из рис.4, а:

$$\Phi = \frac{A}{F_r} = \frac{\pi D n h}{0,5(D - D_0)h} = \frac{2\pi n}{1 - \bar{D}},$$

где h – высота потока в циклоне, м, $\bar{D} = D_0 / D$;

D_0 - диаметр внутреннего цилиндра циклона,

u - число оборотов потока до выхода из циклона.

Окончательное выражение для определения параметра золоулавливания в циклоне принимает вид

$$\Pi = \frac{\tau_p u}{R} \cdot \frac{2\pi n}{1 - \bar{D}}.$$

Вторая дробь в формуле определяется формой циклона - относительным диаметром выходного отверстия, глубиной погружения трубы и углом установки подводящего к циклону патрубка.

Входящая в формулу времени релаксации динамическая вязкость μ для условия золоулавливания меняется мало, составляя при температуре газов 150°C в среднем $22 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$.

В настоящее время циклоны устанавливаются на котлах паропроизводительностью до 500 т/ч. Причем для повышения эффективности применяются батарейные циклоны, составленные из циклопов малого диаметра, обычно около 250 мм. Гидравлическое сопротивление батарейных циклонов составляет около 500...700 Па.

В качестве элемента батарейных циклопов используется большое число модификаций:

- с аксиальным подводом газа и лопаточными завихрителями;
- с тангенциальным подводом газа;
- прямоточные;
- др.

Широко применяются для энергетических установок элементы с тангенциальным улиточным подводом газа типа “Энергоуголь” с внутренним диаметром 231 мм (рис.4, б). Нормальный ряд таких циклонов для колов паропроизводительностью от 20 до 500 т/ч представлен в табл.4.

В маркировке циклонов содержатся основные данные по типоразмерам, например, $4 \times 14 \times m$ означает 4-ех секционный аппарат с 14-ю элементами в глубину с m элементами по ширине (их может быть от 7 до 24).

Расчет батарейного циклона

Расчет батарейного циклона рекомендуется проводить в следующей последовательности.

1. Определяется расход газов, $\text{м}^3/\text{с}$, при котором обеспечиваются оптимальные условия работы циклонного элемента, по формуле

$$q_{\text{ОПТ}} = 0,785 D^2 \omega_{\text{ОПТ}},$$

где $\omega_{\text{ОПТ}}$ – оптимальная скорость потока в элементе, м/с (табл.4);

D – внутренний диаметр элемента, м.

**Технические характеристики батарейных
циклонов серийного изготовления**

Таблица 4

Тип циклона, завод изготовитель, ОСТ или ТУ	Число элементов в секции n , шт.	Оптимальная скорость газа в элементе ω , м/с	Производительность по газу одной секции Q , м ³ /с	Коэффициент сопротивления ξ	Область промышленного применения
ЦБ-254Р , Семibrатовский завод газоочистительной аппаратуры, ОСТ 26-14-2002-77, ОСТ 26-14-2003-77	25, 30, 40, 50, 60, 80	4,5	5,6...16,2	90	Очистка газа при температуре до 400 °С
ЦБ-23IV , Семibrатовский завод газоочистительной аппаратуры, ОСТ 26-14-2002-77	12, 16, 20, 25, 30, 42, 56, 63	4,5	2,2...11,7	110	То же
ЦБ-2 , Кусинский машиностроительный завод, ОСТ 108-033 взамен ОСТ 24-03-001	20, 25, 30	4,5	4,84...13,6	70	Очистка газа при температуре до 150 °С
ПЦБ , карагандинский машиностроительный завод №2, ТУ 12-44-21-038-75	24, 36, 48, 96	3,5	4,2...15,7	150	Очистка газа при температуре до 120 °С. Аппараты выпускаются во взрывобезопасном исполнении

2. Число циклонных элементов, необходимое для оптимальной работы батарейного циклона, определяется как

$$n_{\text{опт}} = \frac{Q}{q_{\text{опт}}},$$

где Q – общий расход газа, м³/с.

3. По табл.4 подбирают батарейный циклон с ближайшим к $n_{\text{опт}}$ количеством циклонных элементов n . Число элементов выбранного батарейного циклона n желательно выбрать таким, чтобы оно не более чем на 10% отличалось от $n_{\text{опт}}$.

Далее определяют действительную скорость потока в элементе, ω , м/с:

$$\omega = \frac{Q}{0,785 D^2 n}.$$

4. Потери давления (аэродинамическое сопротивление) в батарейном циклоне, Па:

$$\Delta p = \xi \frac{\rho \omega^2}{2},$$

где ξ - коэффициент гидравлического сопротивления, принимается по табл.4.

5. Необходимая площадь сечения батарейного циклона определяется по выражению:

$$F_{ц} = \frac{V}{\omega Z},$$

где Z – число батарейных циклонов на котел;

V – количество очищаемого газа при нормальной нагрузке котла, м³/с.

6. Параметр улавливания определяется по приближенному выражению:

$$\Pi_i = 0,5 \sqrt{\frac{u_d}{4,5}} \sqrt{d_i^2},$$

где d_i – средний диаметр фракции, мкм;

u_d – скорость газов м/с.

6. По параметру Π_i определяется степень уноса каждой фракции (по выражению $\varepsilon_i = \exp(-\Pi_i)$), а затем общая степень уноса золоуловителя:

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^{i=k} \varepsilon_i \frac{\phi_i}{100},$$

где k – число фракций.

Положительный опыт длительной эксплуатации батарейных циклонов на многих электростанциях позволяет рекомендовать их для ряда случаев, в частности для очистки:

- дымовых газов от золы при сжигании малозольных топлив, главным образом – бурых углей;
- рециркуляционных газов котлов от золы с целью защиты дымососов системы рециркуляции от износа;
- сушильного агента от невзрывоопасной угольной пыли, например марок АШ, в системах подготовки топлива.

3.1. Прочие инерционные золоуловители

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

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

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

Жалюзийные пылеуловители

Жалюзийные пылеуловители - это аппараты для очистки газов от пыли инерционного действия. Движущийся в газопроводе запыленный поток встречается с жалюзийной решеткой, состоящей из ряда наклонно установленных пластин, рис.5.

Огибая пластины, струи газа резко меняют направление движения, проходят на другую сторону решетки и движутся в прежнем направлении. Частицы пыли, встречаясь с пластинами решетки, стремятся по инерции сохранить пер-

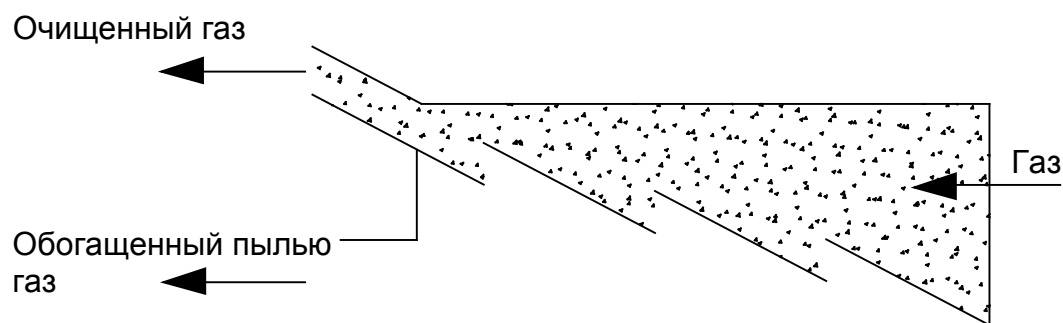


Рис. 5. Схема действия жалюзийного пылеуловителя

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

Жалюзийный пылеуловитель применяют для улавливания пыли размером >20 мкм.

Вихревые пылеуловители

Вихревые пылеуловители (ВПУ) - это аппараты центробежного действия для очистки газов от пыли. Отличительная особенность ВПУ - высокая степень очистки газов от тончайших фракций ($<3...5$ мкм) пыли. Существует две основные разновидности ВПУ: сопловой (рис.6, а) и лопаточный (рис.6, б).

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

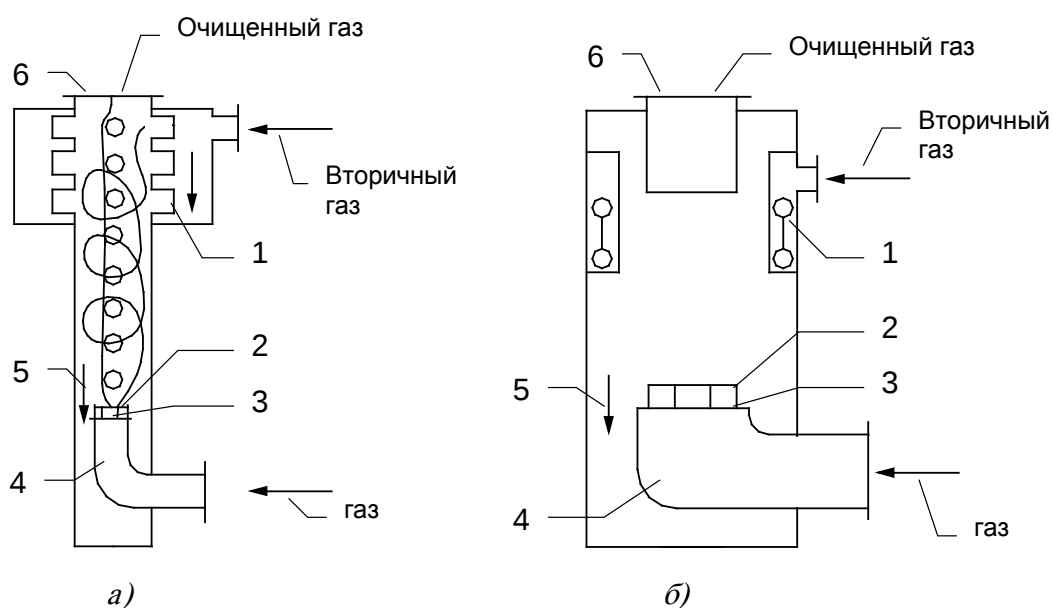


Рис.6. Вихревые пылеуловители: сопловой (а) и лопаточный (б)

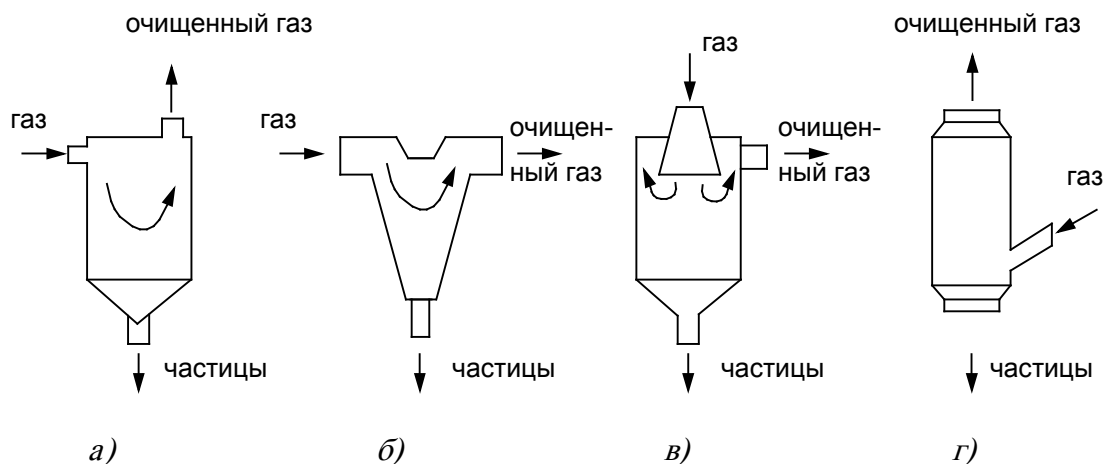


Рис.7. Отражательные инерционные пылеуловители:

а - с перегородкой; *б* - с плавным поворотом газового потока; *в* - с расширяющимся конусом; *г* - с боковым подводом газа;

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

Отражательные инерционные пылеуловители

Отражательные инерционные пылеуловители - это аппараты для выделения пыли из газового потока, в которых происходит изменение направления газового потока. Сталкиваясь с каким-нибудь телом, обтекая его, частицы пыли или капли, обладающие большей инерцией, ударяются о поверхность тела и оседают на ней. Некоторые типы отражательных пылеуловителей приведены на рис.7.

Ротационные пылеуловители

Ротационные пылеуловители - это аппараты для очистки газов от пыли, центробежного действия, которые одновременно с перемещением газов очищают его от фракций пыли крупнее 5 мкм. Конструктивная схема простейшего пылеуловителя ротационного типа представлена на рис.8.

При работе вентиляторного колеса 1 частицы пыли за счет центробежных сил отбра-

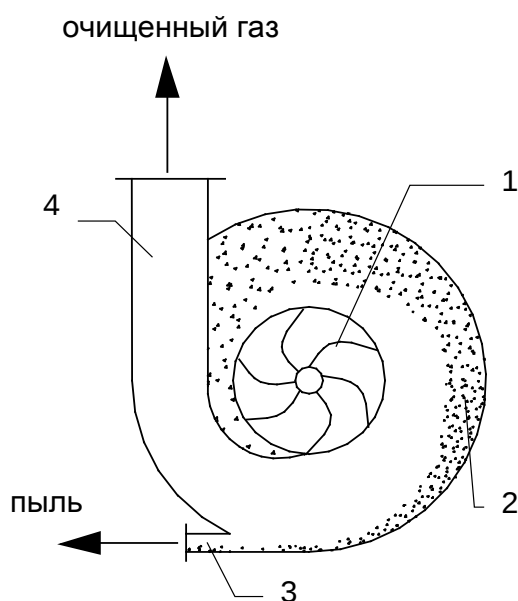


Рис.8. Пылеуловитель ротационного типа:

1 - вентиляторное колесо; 2 - кожух; 3 - пылеприемное отверстие; 4 - выхлопной патрубок

сываются к стенке спиралеобразного кожуха 2 и двигаются по ней в направлении выходного отверстия 3. Газ, обогащенный пылью, через специальное пылеприемное отверстие 3 отводится в пылевой бункер, а очищенный газ поступает в пылевую трубу 4.

4. Мокрые золоуловители

Простейшим типом мокрого золоуловителя является центробежный скруббер (рис.9, а). Главным отличием его от сухого инерционного золоуловителя является наличие на внутренней стенке стекающей пленки воды. Отсепарированная за счет центробежных сил зола лучше отводится из скруббера в бункер, при этом уменьшается вторичный захват зольных частиц со стенки газовым потоком. Характер зависимостей описывается такими же теоретическими формулами, как и для сухих инерционных золоуловителей.

Золоуловитель типа МП-ВТИ (микропрутковый конструкции Всесоюзного теплотехнического института им. Ф. Э. Дзержинского) во входном патрубке 1 (рис.9, а) имеет шахматный пучок горизонтальных прутков диаметром 20 мм. Прутковые решетки орошаются водой, распыливаемой механическими форсунками, установленными по ходу очищаемых газов перед решетками. Улавливание золы в аппарате МП-ВТИ проходит две ступени: на орошаемых решетках за счет осаждения частиц золы и на внутренней орошаемой поверхности скруббера. Эффективность золоулавливания составляет 88...90%.

Недостатками золоуловителей МП-ВТИ кроме низкой эффективности золоулавливания являются следующие:

- возникновение отложений золы в прутковых пучках, что приводит к увеличению аэродинамического сопротивления и снижению нагрузки котла;
- повышенный расход воды для обеспечения нормального функционирования золоуловителя.

Уральским отделением Союзтехэнерго совместно с ВТИ разработаны и внедрены на многих электростанциях более эффективные мокрые золоуловители с коагуляторами Вентури (рис.9, б). Основными достоинствами этих аппаратов являются стабильная степень очистки газов от золы, составляющая 94...96% при умеренном аэродинамическом сопротивлении (1100 -1300 Па), относительно небольшие капитальные и эксплуатационные затраты, а также возможность работы на оборотной воде. Попытки осуществить питание аппаратов типа МП-ВТИ оборотной осветленной водой с золоотвала, чтобы избежать ее сброса в водоемы общего пользования, приводили к образованию в прутковых пучках трудноудаляемых минеральных отложений, серьезно нарушающих работу золоуловителя. При этом наблюдалось:

- падение степени очистки газов;
- возрастание аэродинамического сопротивления;
- появление интенсивного брызгоуноса.

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

Принцип работы мокрого золоуловителя с коагулятором Вентури заключается в следующем, рис.9, б. В конфузор 3 коагулятора через форсунки подается орошающая вода, которая дополнительно диспергируется (распыляется) скоростным газовым потоком на мелкие капли. Летучая зола при прохождении с дымовыми газами через коагулятор частично осаждается на каплях и на его орошаемых стенках. Далее капли и неуловленные частицы золы поступают в корпус аппарата - центробежный скруббер, где дымовые газы освобождаются

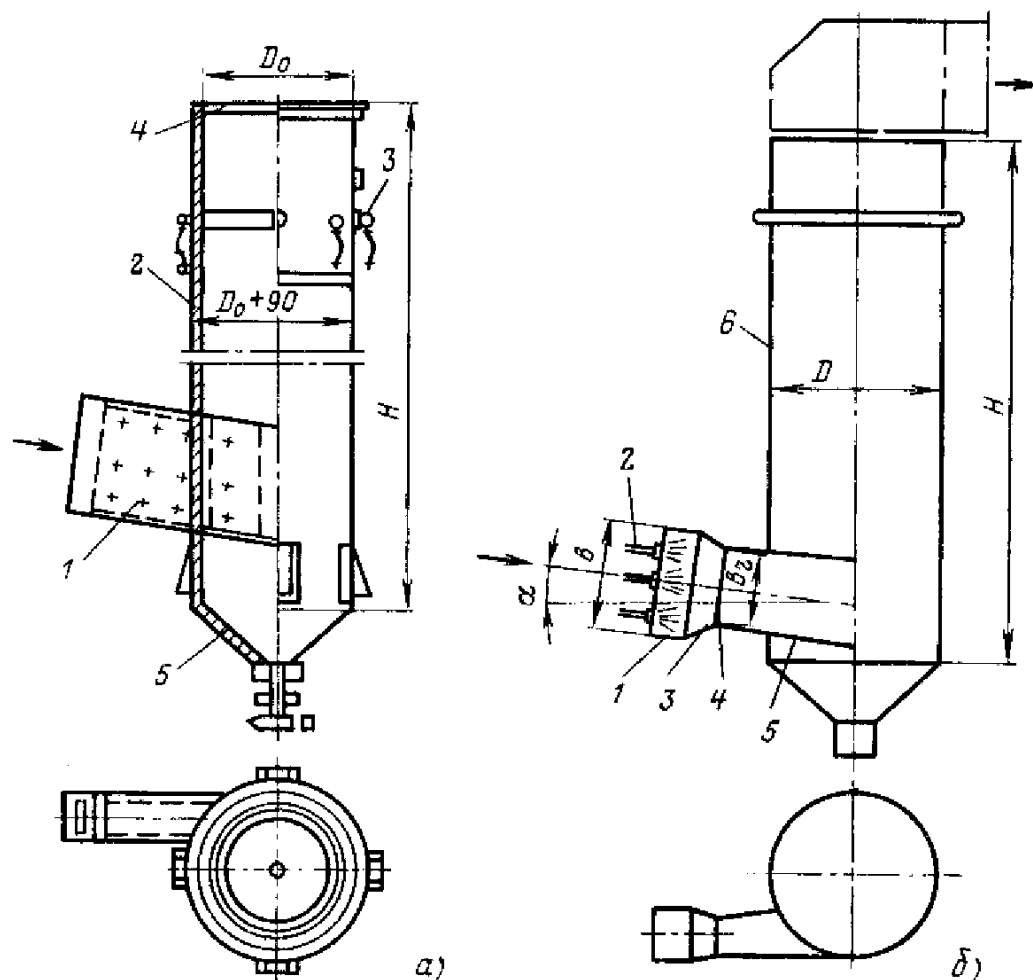


Рис.9. Мокрые золоуловители:

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

от капель и дополнительно очищаются от золы, после чего дымососом выбрасываются в атмосферу. Гидрозоловая пульпа сбрасывается через гидрозатвор в канал системы гидрозолоудаления (ГЗУ).

В конфузоре пылегазовый поток разгоняется от 4...7 до 50...70 м/с. Дополнительное дробление капель воды осуществляется в горловине 4. В диффузоре 5 происходит столкновение частиц золы с каплями воды (кинематическая коагуляция) и снижение скорости пылегазового потока, который, в свою очередь, тангенциально вводится в скруббер.

Размер капель тем меньше, чем больше скорость газа в горловине. Средний диаметр капель d_K , м, можно определить

$$d_K = \frac{5 \cdot 10^3}{u_r},$$

где u_r - скорость газа в горловине, м/с.

Захват частиц золы каплями может происходить по двум причинам:

- быстро несущиеся со скоростью газов частицы золы попадают в капли, которые еще не успели разогнаться потоком газа. Тогда они попадают в каплю за счет разности скоростей ($u_r - u_k$), где u_k - скорость движения капли;
- за счет турбулентных пульсаций частиц золы, которые попадают в практически мало пульсирующие капли.

Если принять за основу коагуляции второй механизм, то параметр золоулавливания для трубы Вентури определяется из выражения

$$\Pi = 0,3 \cdot \varepsilon_T \cdot q_{Ж} \cdot u_r \cdot L,$$

где ε_T - степень турбулентных пульсаций, определяемая как отношение скорости дрейфа к скорости газа в горловине;

$q_{Ж}$ - удельный расход орошающей жидкое на 1 м³ очищаемого газа, л/м³;

L - расстояние между горловиной трубы и скруббером.

В отличие от других золоуловителей для мокрых золоуловителей с коагулятором Вентури в формулу ($\Pi = \sqrt{q_{Ж} u_r}$) для расчета параметра золоулавливания не входит диаметр частиц d . В первом приближении можно принять, что все частицы от мелких до крупных улавливаются одинаково, и их дисперсный состав не учитывать.

В отечественной практике применение получили два типа мокрых золоуловителей с коагулятором Вентури: МВ-УО ОРГРЭС и МС-ВТИ. Первый тип золоуловителя выполняется с вертикальным и горизонтальным расположением коагулятора Вентури круглого сечения, второй только с горизонтальным расположением трубы прямоугольного сечения.

Основные характеристики золоуловителя МС-ВТИ представлены в табл.5.

Типоразмеры золоуловителей МС-ВТИ

Таблица 5

Каплеуловитель				Горловина трубы Вентури	
Диаметр, м	Высота, м	Активная площадь сечения, м ²	Сечение входного патрубка, м ²	Размеры, м	Площадь сечения, м ²
2,8	9,66	5,72	1,37	0,39×1,17	0,455
3	10,32	6,6	1,67	0,43×1,23	0,53
3,2	10,98	7,54	1,95	0,48×1,4	0,644
3,6	12,2	9,62	2,41	0,45×1,8	0,81
4	13,61	11,93	3	0,50×2	1
4,5	15,25	15,2	3,88	0,57×2,28	1,3

Расчет золоуловителей подобного типа ведется в следующей последовательности.

1. Определяется диаметр каплеуловителя, м, причем скорость газов в его сечении принимается в среднем $\omega=5$ м/с:

$$D = \sqrt{\frac{Q}{0,785 \cdot \omega}},$$

где Q - общий расход газа м³/с.

Затем по табл. 5 подбирают типоразмер аппарата.

2. В зависимости от принятой степени проскока ε находят по табл. 3 параметр золоулавливания Π и выбирают $q_{ж}$ и u_r , таким образом, чтобы соблюдалось равенство

$$\Pi = \sqrt{q_{ж} u_r}.$$

Обычно $u_r = 50 \dots 70$ м/с, $q_{ж} = 0,12 \dots 0,2$ кг/м³.

3. Определяют площадь сечения горловины Вентури по выражению

$$F_r = \frac{V}{Z \cdot u_r}.$$

По табл.5 подбирают сечение горловины и корректируют соответственно действительную скорость газов.

По выражению $\Pi = \sqrt{q_{ж} u_r}$ уточняют значение Π и, затем, по табл.3 степень проскока ε .

4. Общее гидравлическое сопротивление коагулятора Вентури и каплеуловителя, Δp , рассчитывается по формуле:

$$\Delta p = (0,25 + 0,01 q_{ж} u_r) \rho \frac{u_r^2}{2} + 2,7 \rho \frac{u_{BX}^2}{2},$$

где ρ - плотность газа перед золоуловителем, кг/м³;

u_{BX} - скорость газа при входе в каплеуловитель, равная

$$u_{BX} = \frac{V}{ZF_r}.$$

Обычно $u_{BX} = 20$ м/с.

5. Конечная допустимая температура очищенных газов, °С, принимается исходя из известной точки росы водяных паров t''_p из соотношения:

$$t \geq t''_p + 21.$$

Не рекомендуется применять мокрые золоуловители для топлив, содержащих в составе золы более 15...20% оксида кальция СаО. Приведенная сернистость топлива должна быть не более 0,3 %·кг/МДж. Жесткость орошаемой воды не должна превышать 15 мг-экв/л.

В соответствии с п.5 температуру газов за мокрым золоуловителем следует поддерживать не менее чем на 21 °С выше точки росы для предотвращения коррозии газоходов.

Обязательным условием нормальной работы мокрого золоуловителя является предотвращение отложений в его орошающих устройствах. Чтобы обеспечить это условие, прежде всего необходимо очистить орошающую воду от механических примесей, для чего применяются гравийные фильтры.

Основной причиной возникновения отложений является кристаллизация солей кальция из пересыщенной ими орошающей воды или пульпы, а также недостаточное по различным обстоятельствам орошение каких-либо участков стенок золоуловителя. Орошающая вода не должна быть пересыщена сернокислым кальцием (СаSO₄), что можно достигнуть, например, добавкой к оборотной воде некоторого количества свежей воды.

При проектировании мокрых золоуловителей следует учитывать, что SO₂ и SO₃ содержащиеся в дымовых газах, частично растворяются в пульпе. При этом если диоксид серы улавливается в мокром золоуловителе до 25%, то три-

оксид серы до 85%. В результате pH пульпы снижается до 3,5 и требуется защита стенок золоуловителя от коррозии. Улавливание SO_3 приводит также к изменению точки росы дымовых газов.

5. Электрофилтры

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

В электрофилтрах запыленный газ движется в каналах, образованных осадительными электродами 1 (рис.10), между которыми расположены через определенное расстояние коронирующие электроды 2.

Сущность процесса электрической очистки газов заключается в следующем. Запыленный газ проходит через систему, состоящую из заземленных осадительных электродов 1 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 зола из-за адсорбции на их поверхности ионов приобретают в межэлектродном промежутке электрический заряд и

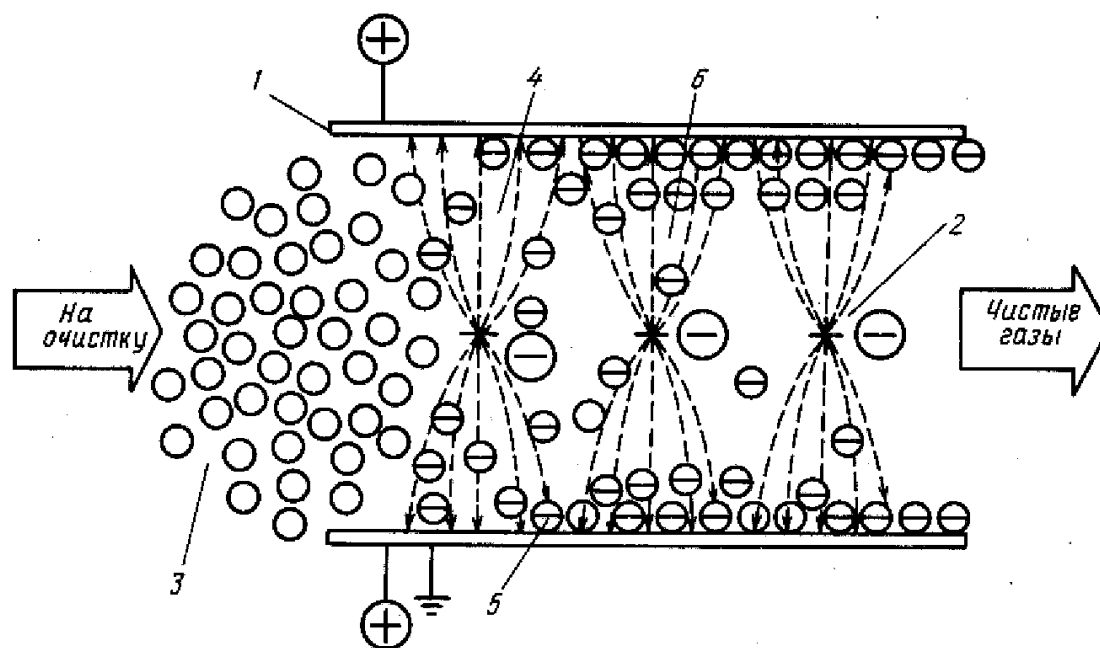


Рис.10. Принцип работы электрофилтра:

1 - осадительный электрод; 2 - коронирующий электрод; 3 - частицы зола; 4 - электрическое поле; 5 - слой осевшей золы; 6 - заряженная зола

под влиянием сил электрического поля движутся к электродам, осаждаясь на них. Основное количество частиц осаждается на развитой поверхности осадительных электродов, меньшая их часть попадает на коронирующие электроды. По мере накопления на электродах осажденные частицы удаляются встряхиванием или промывкой электродов.

Процесс электрогазоочистки можно разделить на следующие стадии:

- зарядка взвешенных в газе частиц;
- движение заряженных частиц к электродам;
- осаждение частиц на электродах;
- удаление этих частиц с электродов.

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

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

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

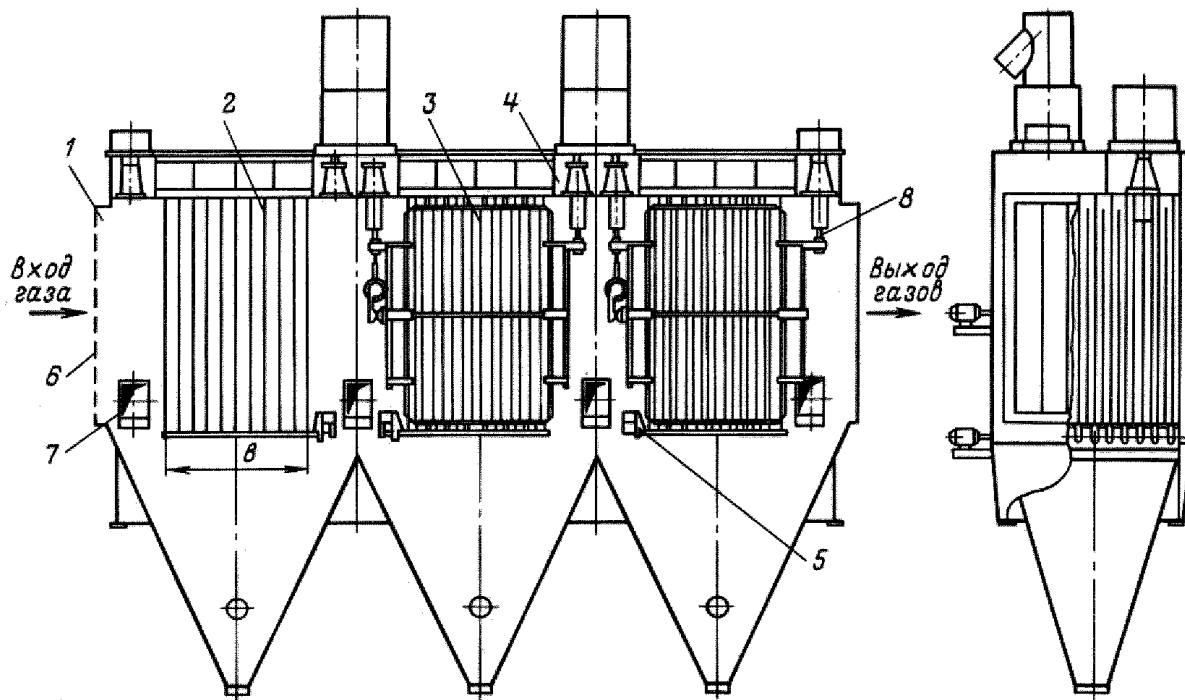


Рис.11. Электрофильтр типа УГ:

1 - корпус; 2 - электрод осадительный; 3 - электрод коронирующий; 4 - механизм встряхивания коронирующих электродов; 5 - механизм встряхивания осадительных электродов; 6 - газораспределительная решетка; 7 - бункер для золы; 8 - изолятор

На большинстве электростанций, оснащенных электрофильтрами, применены аппараты типа УГ (унифицированный горизонтальный). Запыленные газы после газораспределительной решетки 6 (рис.11) поступают в коридоры, образованные вертикально висящими широкополосными осадительными электродами С-образной формы. Коронирующие электроды представляют собой профильные ленточные элементы с штампованными иглами, укрепленные в специальной рамке. Для удаления осевшей на электродах золы предусмотрены встряхивающие устройства в виде молотков, ударяющих по наковальням электродов. Осевшая зола попадает в бункера и затем через гидравлические затворы направляется в систему ГЗУ. Расчетная температура газов до 250 °С.

Электрические поля имеют самостоятельное питание и систему встряхивания. На рис.11 показан трехпольный электрофильтр типа УГ. В первом поле оседает наибольшее количество золы, в последнем - минимальное.

Важным условием, определяющим эффективность работы электрофильтра, является агрегат электрического питания. Каждый агрегат обслуживает одно поле (или половину поля), состоит из трех узлов:

- повысительно-выпрямительного блока с высоковольтным распределительным устройством;
- блока магнитных усилителей;
- дросселей и пульта управления.

Для поддержания напряжения в любой момент работы электрофильтра на грани пробивного, когда обеспечивается наилучшая ионизация газов, применена автоматическая схема регулирования. Электрофильтры серии УГ имеют две разновидности: УГ2 - с высотой электрода 7,5 и активной длиной каждого поля 5 м и УГ3 - с высотой электрода 12,2 и длиной поля 4 м.

Число полей n в каждом электрофильтре может быть три и четыре. Поперечные сечения для прохода газов F_r , м², для электрофильтров УГ2 имеют следующие значения: 26, 37, 53, 74; для электрофильтров УГ3: 88, 115, 177, 230, 265. Параметры золоулавливания электрофильтра рассчитываются по выражению

$$\Pi = g \cdot f,$$

где g - скорость дрейфа частиц, м/с (скорость движения частиц золы под действием сил осаждения);

$f = A/V$ - удельная площадь поверхности осаждения на 1 м³/с очищаемого газа. Здесь A - площадь поверхности канала золоулавливания, м²; V - расход газа, м³/с.

Степень осаждения определяется двумя факторами - скоростью дрейфа частиц золы g и удельной поверхностью осаждения f . Увеличивая f , можно получить высокую степень улавливания, однако это связано с большими расходами металла и увеличением габаритов электрофильтров.

Скорость дрейфа g , м/с, определяется в основном электрическими характеристиками электрофильтра и пылегазового потока и выражается как:

$$g = \frac{\varepsilon_0 E_3 E_{OC} d}{\mu} \cdot \frac{\varepsilon}{\varepsilon + 2},$$

где ε_0 - диэлектрическая проницаемость вакуума, Ф/м;

ε - относительная диэлектрическая проницаемость вещества частицы;

E_3 - напряженность электрического поля зарядки, В/м;

E_{OC} - напряженность электрического поля осаждения, В/м.

Из приведенного выражения следует, что скорость дрейфа пропорциональна произведению напряженностей полей зарядки и осаждения и диаметру частицы (влияние остальных факторов менее существенно). Однако определить теоретическим путем величины E_3 и E_{OC} затруднительно, из-за чего расчет по приведенному выражению возможен при наличии опытных данных по электрическим характеристикам.

Основными факторами, определяющими скорость дрейфа, являются электрические свойства пылегазового потока и в первую очередь электрическое сопротивление золы. На рис.12, а показана зависимость удельного сопротивления летучей золы ρ , Ом·м, при работе электрофильтра от температуры. Максимум электрического сопротивления золы соответствует температуре 100...130 °С. Наибольшее ρ имеет зола углей с малым содержанием горючих в уносе, низким содержанием серы и влаги в топливе. К углям, зола которых имеет наиболее высокое электрическое сопротивление, относятся экибастузский и кузнецкий каменные угли. На рис.12, б показано изменение скорости дрейфа g от удельного сопротивления ρ . В области $\rho=10^8...10^9$ Ом·м происходит резкое падение скорости дрейфа.

Анализ работы электрофильтров на ТЭС показал, что основная причина менее эффективной очистки заключается в высоком удельном электрическом сопротивлении (УЭС) ρ слоя золы, образующемся на осадительных электродах электрофильтра. Вследствие высокого УЭС проводимость слоя пыли уменьшается, что приводит к увеличению потенциала поверхности слоя, увеличению падения напряжения в слое при одновременном его уменьшении в газовом промежутке. При увеличении разности потенциалов между поверхностью слоя и заземленным электродом до значения, достаточного для пробоя газов, на некоторых участках поверхности слоя возникают относительно стабильные местные разряды. Это явление, вызывающее образование и выброс в межэлектродное пространство ионов со знаком, обратным знаку ионов, образующихся в

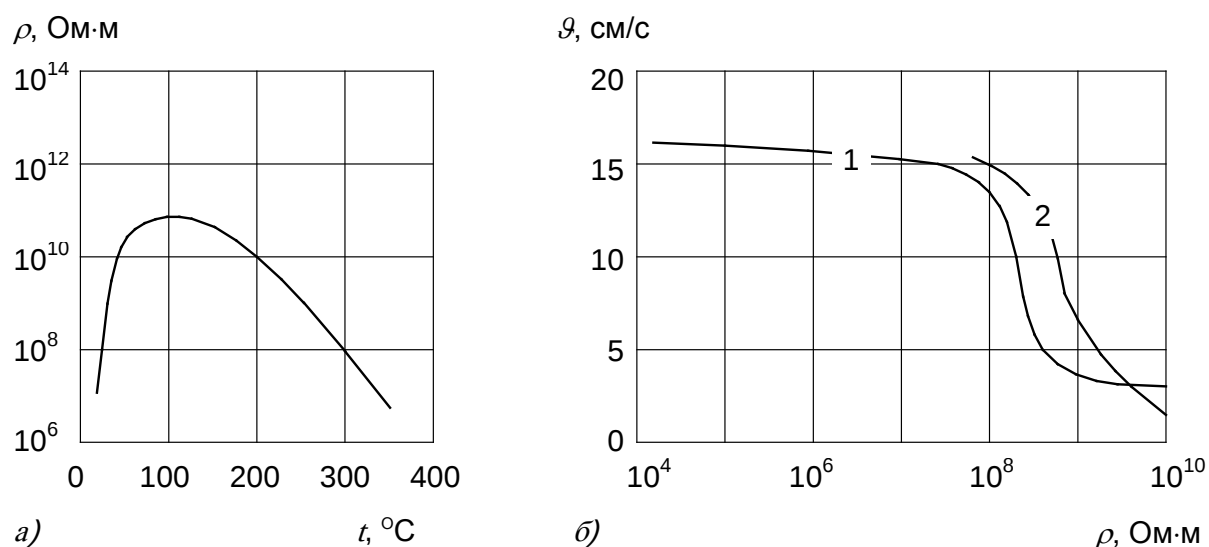


Рис.12. Влияние удельного сопротивления летучей золы на работу электрофильтра:

а - зависимость удельного сопротивления летучей золы при работе электрофильтра от температуры; б - зависимость скорости осаждения от удельного сопротивления пыли; 1 - цементная пыль; 2 - зола уноса котлов

основном процессе, принято называть обратной короной. Положительные ионы, образовавшиеся в зоне обратной короны, под действием электрического поля двигаются к коронирующему электроду, встречают на своем пути частицы золы, заряженные отрицательно, и нейтрализуют их заряды. В результате этого прекращается движение золовых частиц к осадительному электроду и снижается степень очистки газов в электрофильтре. Устойчивая обратная корона характеризуется появлением в слое пыли точек локализованных разрядов голубого цвета.

Высокое УЭС летучей золы обусловлено как параметрами дымовых газов (концентрация серного ангидрида и зависящая от него кислотная точка росы, парциальное давление водяных паров, температура газов и др.), так и химическим составом самой золы, главным образом соотношением в ней алюмосиликатов ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2$) и щелочных металлов, в первую очередь натрия и лития. При определенной комбинации низких содержаниях серы, водорода и влаги в угле с низкими концентрациями щелочных металлов в золе при общепринятых в котельной практике температурах уходящих газов 120...150 °С удельное электрическое сопротивление золы вырастает до $10^{10} \dots 10^{12}$ Ом·м. При таких параметрах обратная корона возникает и развивается в электрофильтре исключительно быстро.

На степень улавливания золы большое влияние также оказывает равномерность распределения поля скоростей дымовых газов по сечению электрофильтра. С целью создания достаточно равномерного поля скоростей газов на входе в электрофильтр устанавливают газораспределительные решетки.

Современные *электрофильтры серии ЭГА* - горизонтальные, модификации А, изготавливаются в широком диапазоне типоразмеров при глубокой унификации узлов и деталей. Такие фильтры рассчитаны на максимальную температуру газов до 330 °С. Электродная система - система, составленная из широкополосных (ширина элемента 40 мм) элементов открытого профиля и рамных коронирующих электродов с игольчатыми элементами. Шаг между одноименными элементами составляет 300 мм. В электрофильтрах по ширине размещается от 10 до 88 газовых проходов. Номинальная высота электродов принимается из ряда 6; 7,5; 9; 12 м.

В связи с повышением мощности энергоблоков потребовалось создание двухъярусного фильтра. Для энергоблоков 800 МВт Березовской ГРЭС-1 разработан и изготовлен на базе серии ЭГА электрофильтр типа ЭГД (горизонтальный, двухъярусный) (рис.13).

Электрофильтры серии УВ (рис.14) - унифицированные вертикальные пластинчатые сухие для очистки газов с температурой до 250 °С, выпускаются взамен электрофильтров ДВП и ДВПН. Электрофильтры типа УВ имеют одно поле активной длины 7,4 м и разделены по газу на одну - три секции. Осадительные электроды - пластинчатые с нижним молотковым стряхиванием. Коронирующие электроды - рамные с верхним подвесом и молотковым встряхиванием.

Электрофильтры УВ рассчитаны на невысокую запыленность газов и скорость их в активном сечении до 1 м/с.

Расчет электрофильтра для ориентировочного определения его размеров ведется в следующем порядке.

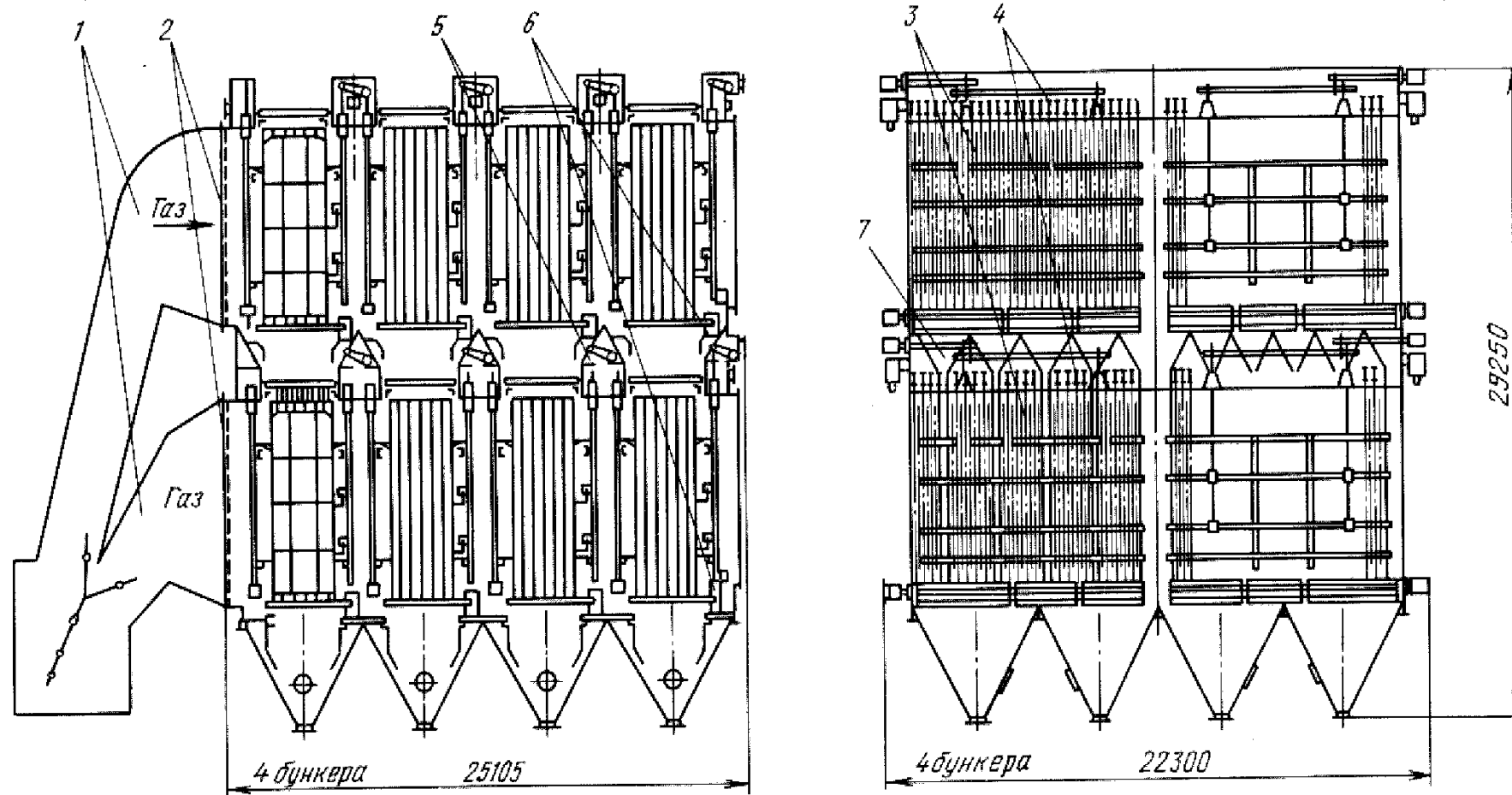


Рис.13. Электрофильтр типа ЭГД:

1 - подводящие газоходы; 2 - газораспределительная решетка; 3 - коронирующий электрод; 4 - осадительный электрод; 5 - механизм встряхивания коронирующих электродов; 6 - механизм встряхивания осадительных электродов; 7 - бункер для пересыпки золы из верхнего яруса

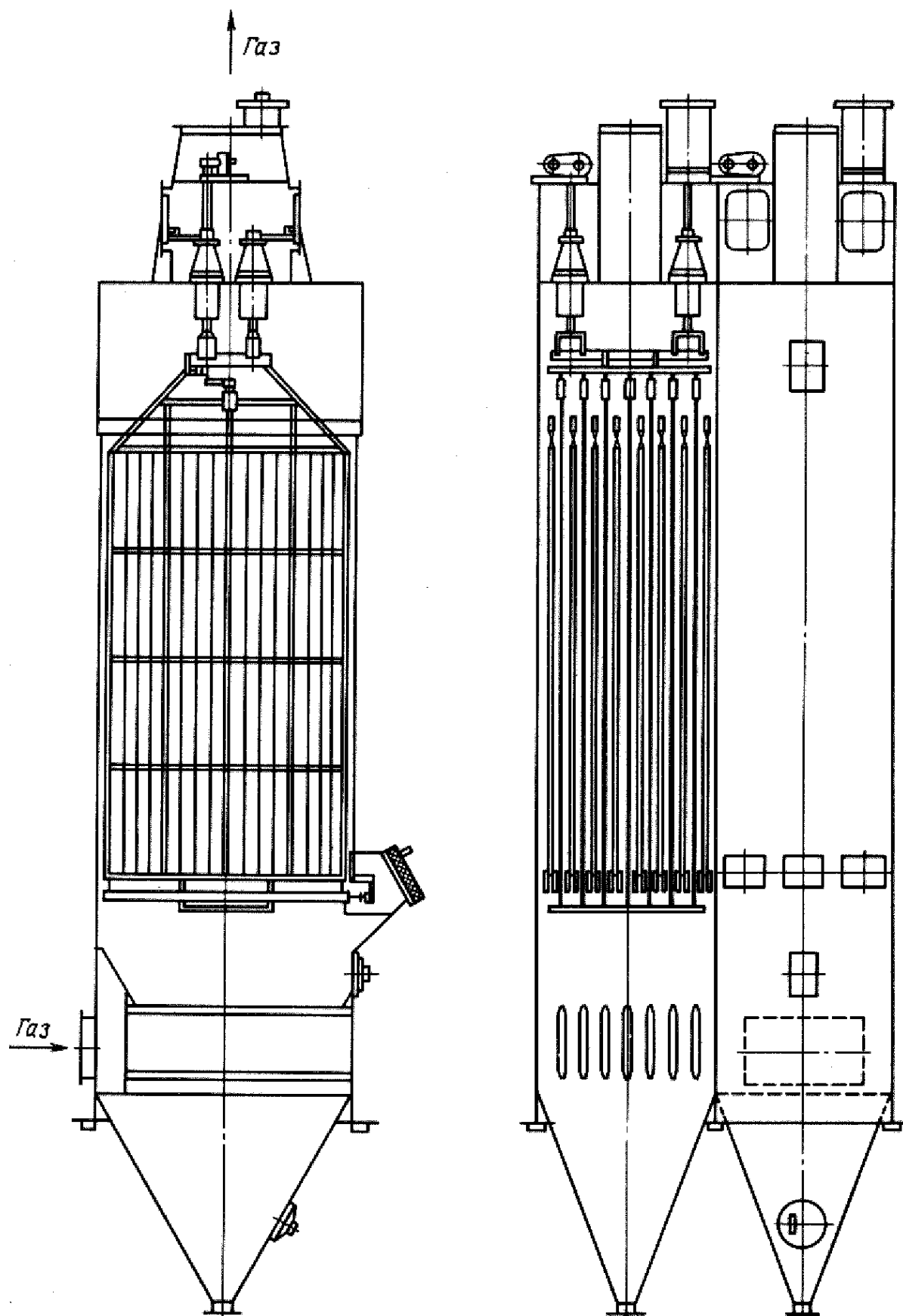


Рис.14. Электрофильтр УВ

1. Определяется активное сечение для прохода газов, м^2 , электрофильтра:

$$\omega = \frac{V}{Z \cdot u},$$

где Z - число параллельно включенных корпусов (рекомендуется устанавливать один-два корпуса на котел, обычно по числу выбранных дымососов);
 u - скорость газов в активном сечении, принимается для золы с неблагоприятными характеристиками ($\rho > 5 \cdot 10^9 \text{ 0м} \cdot \text{м}$) в пределах 1,3—1,5 м/с, для остальных топлив ($\rho < 5 \cdot 10^9 \text{ 0м} \cdot \text{м}$ до 1,8 м/с).

Далее подбирается ближайшее поперечное сечение электрофильтра ω_d , выбирается высота электрода и уточняется действительная скорость газов для выбранного сечения.

2. Принимается схема газораспределения электрофильтра и оценивается степень заполнения объема m . По заданной степени уноса ε определяется степень уноса при равномерном потоке ε_p , по выражению

$$\varepsilon = \varepsilon_p^m.$$

Степень заполнения m определяется экспериментально на моделях электрофильтра с примыкающими газоходами.

3. По табл.3 определяется по найденной степени уноса при равномерном поле параметр золоулавливания Π .

4. Задавая скорость дрейфа ϑ в зависимости от используемого на ТЭС топлива рассчитывается поверхность осаждения

$$f = \frac{\Pi}{\vartheta}.$$

При расчете электрофильтров можно принимать для различных топлив следующие скорости дрейфа частиц ϑ м/с:

Кузнецкий СС, экибастузский	- $5,5 \cdot 10^{-2}$;
Донецкий промпродукт	- $5,5 \cdot 10^{-2}$;
Канско-ачинский	- $(6 \dots 6,5) \cdot 10^{-2}$;
Донецкий:	
ГСШ	- $7 \cdot 10^{-2}$;
АШ	- $(8 \dots 9) \cdot 10^{-2}$;
Подмосковный	- $(10 \dots 12) \cdot 10^{-2}$.

5. Число полей электрофильтра при заданной длине поля определяется по выражению

$$n = \frac{f \cdot u_d \cdot t}{2 \cdot l},$$

где t - расстояние между одноименными электродами (для электрофильтров УГ $t = 0,275 \text{ м}$);

l - длина поля.

Выбирается действительное число полей электрофильтра n_d . Уточняется действительное значение параметра золоулавливания Π_d и соответственно ε_p^d и ε_d .

6. Особенности улавливания золы с неблагоприятными электрофизическими свойствами

Решение проблемы эффективной электрической очистки дымовых газов, имеющих неблагоприятные электрофизические свойства, состоит в разработке методов снижения интенсивности или предотвращения образования обратной короны, т. е. создании условий, обеспечивающих стабильную работу электрофильтров. В современных электрофильтрах уже достигнута близкая к максимально возможной равномерность распределения тока короны по поверхности осадительных электродов путем, например, использования игольчатых коронирующих электродов с рациональной геометрией.

Важным направлением в решении проблемы улавливания золы с высоким УЭС является кондиционирование дымовых газов, которое заключается в изменении их свойств при добавлении к ним химических веществ или водяного пара, адсорбирующихся на поверхности частиц золы и увеличивающих их поверхностную проводимость.

Химические методы кондиционирования. В качестве кондиционирующих добавок применяются триоксид серы, водяной пар, аммиак и другие соединения. Сравнительно небольшое количество триоксида серы, добавленное к продуктам сгорания топлив, существенно уменьшает электрическое сопротивление слоя золы, осаждающейся на электродах. При добавке к продуктам сгорания триоксида серы в количестве около 20 миллионных долей по объему (20 PPM) эффективность улавливания высокоомной золы заметно растет. Дальнейшее увеличение этой добавки, как правило, не сопровождается заметной интенсификацией золоулавливания.

Триоксид серы для целей кондиционирования может быть получен с помощью одного из следующих способов: кипячением серной кислоты, разложением олеума, превращением диоксида серы в триоксид, испарением стабилизированного триоксида серы, сжиганием серы в присутствии катализатора. Применение одного из способов получения триоксида серы определяется в ос-

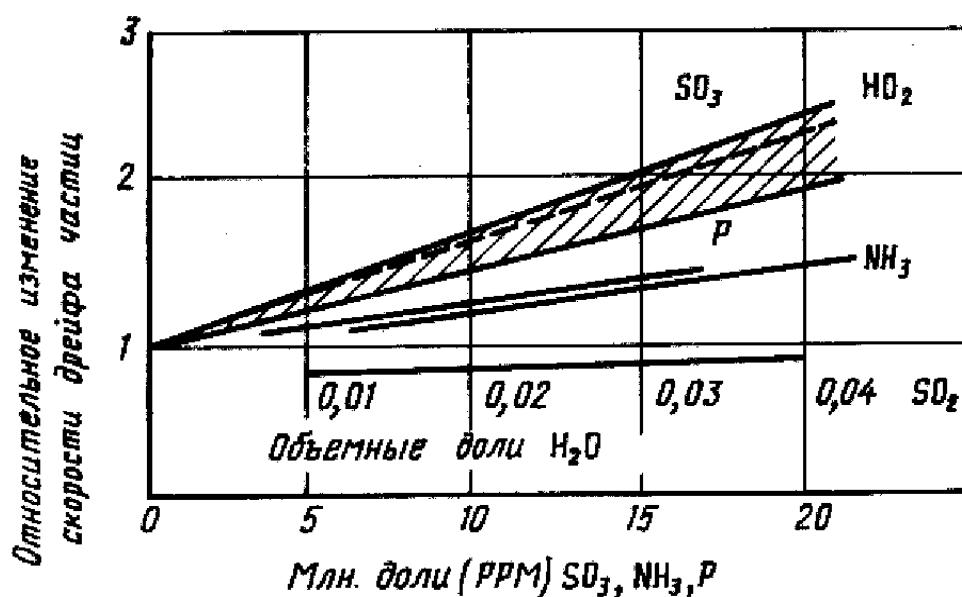


Рис.15. Влияние ввода различных присадок в дымовые газы на изменение скорости дрейфа частицы золы

новном экономическими соображениями.

Увеличение содержания водяных паров в очищаемых газах, как известно, не только снижает УЭС золы за счет роста проводимости поверхностной пленки, но также обеспечивает возможность повышения рабочего напряжения на коронирующих электродах благодаря увеличению диэлектрической прочности дымовых газов. Так, например, при работе электрофильтра на чистом воздухе увеличение содержания в нем водяных паров от 30 до 75 г/м³ позволяет повысить пробивное напряжение на 15—20%. В то же время исследования показали, что влияние влагосодержания на работу электрофильтра может быть существенно различным в зависимости от температуры газов. С ростом температуры для сохранения одинакового эффекта электрической очистки влагосодержание газов может быть более значительным. Эффективность различных кондиционирующих агентов можно сравнить по относительному изменению скорости дрейфа частиц в электрическом поле. На рис.15 показана зависимость этого параметра от содержания в дымовых газах различных кондиционирующих добавок: триоксида серы, аммиака, фосфора и водяного пара, а также диоксида серы.

Температурный метод кондиционирования. Зависимость УЭС золы от температуры носит экстремальный характер (см. рис.12). Такой вид зависимости можно объяснить различиями в протекании электрического тока через слой золы.

Установлено, что сопротивление слоя золы определяется как его поверхностной проводимостью, так и объемной. При низкой температуре УЭС золы определяется поверхностной проводимостью, обусловленной адсорбцией (поглощением) поверхностью золы влаги и различных химических веществ (в первую очередь серного ангидрида) из дымовых газов.

При высоких температурах газов УЭС золы определяется объемной проводимостью, обусловленной механизмом ионной проводимости, при которой главными переносчиками зарядов являются ионы щелочных металлов. Для данного химического состава золы ее объемное сопротивление зависит также от температуры газов и напряженности электрического поля.

Из рассмотрения зависимости удельного электрического сопротивления золы от температуры следует, что преодоление высокого омического сопротивления летучей золы и обратного коронирования в электрофильтре, а также обеспечение высокой степени очистки газов при приемлемых габаритах электрофильтра могут быть достигнуты различными технологическими путями.

Одним из путей является создание котлов, рассчитанных на весьма низкую температуру уходящих газов путем сооружения более развитых, чем обычные, хвостовых поверхностей нагрева (использование левой ветви зависимости удельного электрического сопротивления от температуры). Исследования показали, что снижение температуры газов до 100 °С приводит к снижению УЭС золы примерно на один порядок. Когда УЭС исходной золы превышает значение $5 \cdot 10^{11}$ Ом·см, необходимо более глубокое охлаждение газов до температуры примерно 80...90 °С. При этом, однако, увеличиваются габариты и стоимость котлов. Могут существенно усложниться их эксплуатация и ремонт в связи с интенсификацией абразивного износа низкотемпературных поверхностей. Поэтому при сжигании топлив, зола которых обладает чрезмерно высоким УЭС, как правило, не идут по пути глубокого охлаждения уходящих газов, хотя в ряде случаев таким способом можно существенно снизить выбросы в атмосферу.

Другой путь снижения омического сопротивления золы заключается в

размещении электрофильтров перед воздухоподогревателем в области температур газов около 350...400 °С (использование правой ветви зависимости удельного сопротивления слоя золы от температуры (рис.12, а). Опыт применения таких электрофильтров имеется в США. Преимущество этого направления состоит не только в достижении эффективной и стабильной очистки газов от высокоомной золы, но и в предотвращении загрязнения золой поверхности воздухоподогревателя.

Скорости движения газов в активном сечении «холодных» и «горячих» электрофильтров должны быть примерно одинаковыми, чтобы обеспечить в обоих случаях высокую степень очистки газов. Удельные объемы продуктов сгорания при температуре 350...400 °С примерно в 1,5 раза выше, чем при температуре 140...150 °С. Поэтому требуются большие проходное сечение и габариты горячих электрофильтров, что приводит к увеличению капитальных затрат и затрудняет компоновку аппаратов в заданной ячейке блока.

Необходимые поверхности осаждения для обеспечения одинаковой степени очистки газов при использовании горячих и холодных электрофильтров оказываются одинаковыми. В этих расчетах, однако, не учитывается, что при установке горячих электрофильтров происходят дополнительные потери теплоты с золой, имеющей температуру 350...400 °С. Для углей с малой золоностью потери теплоты относительно невелики. Для высокозольных углей (например, экибастузского) установка горячих электрофильтров перед воздухоподогревателями котла приведет к снижению КПД котла примерно на 1%, что вряд ли можно считать оправданным.

Размещение электрофильтров в области температур 350...400 °С, при обеспечении их нормальной работы и при наличии золы с высоким УЭС, связано с определенными затруднениями в очистке газов, поскольку при этом изменяются их свойства. Так, например, возрастает вязкость газов и поэтому уменьшается при прочих равных условиях скорость дрейфа частиц золы.

С увеличением температуры газов становятся более сложными аппараты вследствие больших термических расширений элементов конструкций, попадания горячей золы в систему золоудаления, дополнительных присосов воздуха перед воздухоподогревателем.

Температурно-влажностное кондиционирование. Одним из эффективных путей улучшения очистки продуктов сгорания с неблагоприятными электрофизическими свойствами является предварительное изменение свойств дымовых газов путем использования преимуществ как температурного, так и влажностного кондиционирования газов, рационального сочетания их, т. е. Путем использования *температурно-влажностного кондиционирования*. Установлено, что применение температурно-влажностного кондиционирования продуктов сгорания экибастузского угля позволяет существенно снизить УЭС золы. При температуре газов 99 °С и одновременном увеличении их влагосодержания на 8 г/м³ УЭС золы снизилось в 70 раз по сравнению с УЭС золы при 136 °С без дополнительного увлажнения. Снижение температуры до 82 °С и увеличение влажности газов на 22 г/м³ уменьшает УЭС на 23 порядка.

Температурно-влажностное кондиционирование дымовых газов может быть осуществлено различными способами. Для высокозольных топлив типа экибастузского угля, когда запыленность очищаемых газов близка к критическому значению по условиям запыления коронного разряда или превосходит его, ВТИ и Союзтехэнерго разработали комбинированную золоулавливающую установку, состоящую из включенных последовательно по ходу газов мокрой

ступени, предназначенной для предварительной очистки газов и их температурно-влажностного кондиционирования, и многопольного электрофильтра. При использовании этой золоулавливающей установки нужно учитывать, что сильное увлажнение продуктов сгорания в мокрой ступени приводит к коррозии металла осадительных электродов.

Большие перспективы имеют охлаждение и увлажнение дымовых газов путем полного испарения влаги в газоходе перед электрофильтром. Это наиболее дешевый и простой способ кондиционирования, практически не требующий громоздкого дополнительного оборудования. Особенно целесообразен этот способ при испарении различных химических стоков и жидких отходов, содержащих соединения натрия, лития и другие кондиционирующие вещества. Этот способ применим в основном при сжигании в котлах средне- и малозольных углей, когда в электрофильтре отсутствует проблема запыления коронного разряда из-за чрезмерно высокой запыленности очищаемых газов.

Метод импульсного питания. Принципиально новым способом борьбы с обратной короной, разрабатываемый в последние годы, может стать применение импульсного напряжения для питания электрофильтров. Одним из преимуществ применения импульсного напряжения для питания электрофильтров является то, что импульсная прочность воздушных промежутков выше их электрической прочности при постоянном напряжении, что позволяет увеличить амплитудное значение напряжения.

Импульсное питание электрофильтров устраняет обратное коронирование. Результаты промышленных испытаний свидетельствуют об эффективности использования импульсной формы волны питающего напряжения. Достижение более высоких амплитудных значений питающего напряжения позволяет предполагать, что при этом будет получен больший удельный заряд пыли.

Первые опыты по применению метода импульсного питания показали, что запыленность на выходе из электрофильтра снижается в 1,5...1,6 раза, а мощность, потребляемая электрофильтром, в 20 раз.

Метод питания электрофильтра знакопеременным напряжением. Другим перспективным способом улавливания высокоомной золы является питание электрофильтра напряжением переменной полярности. Способ питания электрофильтра знакопеременным напряжением низкой частоты прямоугольной формы позволяет устранить обратную корону. Суть способа заключается в том, что полярность электрического напряжения меняется каждый раз, когда напряженность в слое приближается к пробивному значению. После переключения полярности, слой на электроде перезаряжается, заряд частиц в межэлектродном пространстве также меняет свой знак и сила, действующая на частицы, по-прежнему оказывается направленной к осадительному электроду.

Метод предварительной ионизации. Одним из перспективных способов улавливания высокоомной золы является ее предварительная зарядка. Принципиально устройство состоит из параллельных групп электродов, через которые проходит газовый поток. Высокое напряжение низкой частоты подается на противоположные по заряду группы электродов. При этом напряженность электрического поля примерно в 10 раз превышает таковую в традиционном электрофильтре. Скорость зарядки очень высокая, что позволяет установить рассматриваемое устройство, например, на входе электрофильтра и использовать его при скорости газового потока выше 10 м/с.

7. Краткие сведения об улавливании золы на мазутных ТЭС

Котлы, сжигающие жидкое топливо, как правило, не оснащены золоуловителями в связи с низким содержанием золы в топливе ($A^P=0,05...0,15\%$).

В последние годы в связи с возросшим загрязнением атмосферного воздуха и более глубоким изучением состава твердых выбросов, образующихся при сжигании мазута, в России и за рубежом проводится работа по опытному промышленному внедрению золоуловителей на мазутных котлах.

Состав минеральной части отечественных мазутов в пересчете на оксиды колеблется в следующих пределах: оксид натрия - 20...40%; пентаксид ванадия - 20...30%; оксид кремния - 5-20%; триоксид серы - 20...40%; триоксид железа - 3...20%; оксид кальция - 3...10%; оксид магния - 3...10%; оксид никеля - 1...10%.

Наряду с минеральной частью топлива в выбрасываемых дымовых газах имеются соединения недогоревшего углерода. На отечественных энергетических котлах твердые частицы в дымовых газах содержат до 60% горючих. Недогоревшие соединения углерода имеют вид сажистых частиц, среди которых наибольшую опасность представляет бенз(а)пирен.

Золотые частицы и сажа осаждаются на трубах поверхностей нагрева котлов и набивке регенеративных воздухоподогревателей (РВП). При обдувке РВП и дробевой очистке поверхностей нагрева происходит так называемый «залповый» выброс твердых частиц.

Для того чтобы выбрать тип улавливающих устройств, обеспечить надежную эвакуацию уловленной золы и сажи, необходимо учитывать свойства уловленных частиц. Дисперсность частиц характеризуется тем, что 20% имеет размер менее 10,5 мкм, а остальные крупнее, причем 55% частиц крупнее 35 мкм. Важным показателем является насыпная плотность. Средняя насыпная плотность составляет 160 кг/м³. Электрическое сопротивление частиц составляет около 10⁵ Ом·см, поэтому такой материал относится к малоомному и трудно улавливаемому в электрофильтрах. Химический анализ уловленных на мазутных котлах твердых частиц показывает, что содержание триоксида серы в них в сотни раз выше, чем в потоке газа. Другой особенностью уловленных частиц является их высокая гигроскопичность и пожароопасность.

Наибольшее распространение в мировой практике на котлах, сжигающих мазут, нашли инерционные золоуловители, как наиболее дешевые при сооружении и простые в эксплуатации. В России инерционные золоуловители на мазутных котлах испытаны на Новосалаватской ТЭЦ и ТЭЦ-16 Мосэнерго. Эффективность улавливания в них составляет 60—80%.

В США, Японии и других странах применяются также и электрофильтры. Наибольшую трудность при эксплуатации электрофильтров представляет налипание твердых частиц на электродах. С налипанием борются обычно впрыскиванием аммиака в газоход перед электрофильтром. Периодически осуществляется водная промывка электрофильтров.

Удаление уловленных твердых частиц на мазутных котлах представляет собой более сложную задачу, чем при работе на твердом топливе. Это объясняется гигроскопичностью, высоким содержанием горючих и потерей сыпучести золы при температуре ниже 150 °С. Поэтому применяется пневматическая или гидравлическая система эвакуации мазутной золы. В связи с тем что в уловленном материале велико содержание углерода, в некоторых схемах предусматривается возврат уловленных частиц на повторное дожигание.

Следует отметить, что улавливание золы на ТЭС и котельных, сжигающих мазут, не только решает вопрос снижения токсичных выбросов, но и дает возможность утилизировать ценные, дефицитные компоненты на основе ванадия и никеля.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Какие свойства золы влияют на ее улавливание в мокрых, инерционных золоуловителях и электрофильтрах?
2. Какая эффективность золоулавливания достигается в золоуловителях различных типов?
3. Принцип работы батарейного циклона.
4. Что, кроме золы, улавливается в мокром золоуловителе?
5. Каковы проблемы работы оборотной системы золоудаления?
6. Особенности конструкции электрофильтра.
7. Объясните принцип улавливания золы в электрофильтре.
8. Что такое обратная корона?
9. Что такое высокоомная зола'?
10. Каковы методы повышения эффективности улавливания высокоомной золы?
11. В чем состоят особенности мазутной золы?