

А. А. ОТС

**ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭСТОНСКИХ  
ГОРЮЧИХ СЛАНЦЕВ. ПРОБЛЕМЫ ПАРОВОГО КОТЛА****Введение**

Залежи горючих сланцев в Прибалтике известны с XVIII в., однако добыча их в промышленном масштабе началась на Эстонском месторождении только в 1916 г. Первыми крупными потребителями сланцев стали в 20-е гг. цементные заводы, где их использовали в виде пыли для обжига цементного клинкера и в слоевых топках заводских электростанций.

Более широкое энергетическое использование эстонских сланцев началось с 1924 г., после перевода Таллинской электростанции на сланцевое топливо с последующим доведением ее мощности до 22 МВт в 1933 г. До второй мировой войны общая мощность электростанций, работающих на сланцах, составляла в Эстонии 30,3 МВт. Для того времени характерно использование котлов с максимальной паропроизводительностью 12 кг/с (35 т/ч), давлением пара 3—4 МПа и температурой 400—450 °С. В топках этих котлов на наклонно-переталкивающих решетках типа «Круль—Ломшаков» и «Ильмарине» сжигался кусковой сланец. Основной проблемой тогда было бессажистое сжигание. Были разработаны и внедрены принципы двухступенчатого сжигания горючих сланцев как топлива с предельно высоким содержанием летучих веществ.

Энергетика на базе слоевого сжигания сланцев развивалась в Эстонии до 50-х гг., когда на электростанциях (а также в промышленности) началось широкое внедрение пылевидного сжигания. Отметим, что первые попытки сжигать пыль эстонских сланцев в топках паровозов и на Таллинской электростанции были неудачны — не удалось справиться с интенсивным загрязнением и забиванием золой трубчатых пучков котла. Не дал удовлетворительных результатов и опыт сжигания пыли гдовских горючих сланцев (Ленинградское месторождение) на котле паропроизводительностью 1,95 кг/с (7 т/ч) в 1936 г.

Первыми мощными котлами среднего давления с шахтно-мельничными топками были модернизированные агрегаты типа «Райли-Стокер» паропроизводительностью 18 кг/с (65 т/ч) на ТЭЦ в Кохтла-Ярве и «Буккау» паропроизводительностью 23,6 кг/с (80 т/ч) на ТЭЦ в Ахтме. Несколько позже на этих же электростанциях были сданы в эксплуатацию котлы БКЗ-75-39Ф<sub>сл</sub> паропроизводительностью 20,8 кг/с (75 т/ч). Общая мощность сланцевых электростанций до использования на них пара высокого давления достигла к концу 1959 г. 165 МВт. В 1960 г. потребление горючих сланцев составило 12,5 млн. т, однако на электростанциях было сожжено лишь около одной пятой из этого количества.

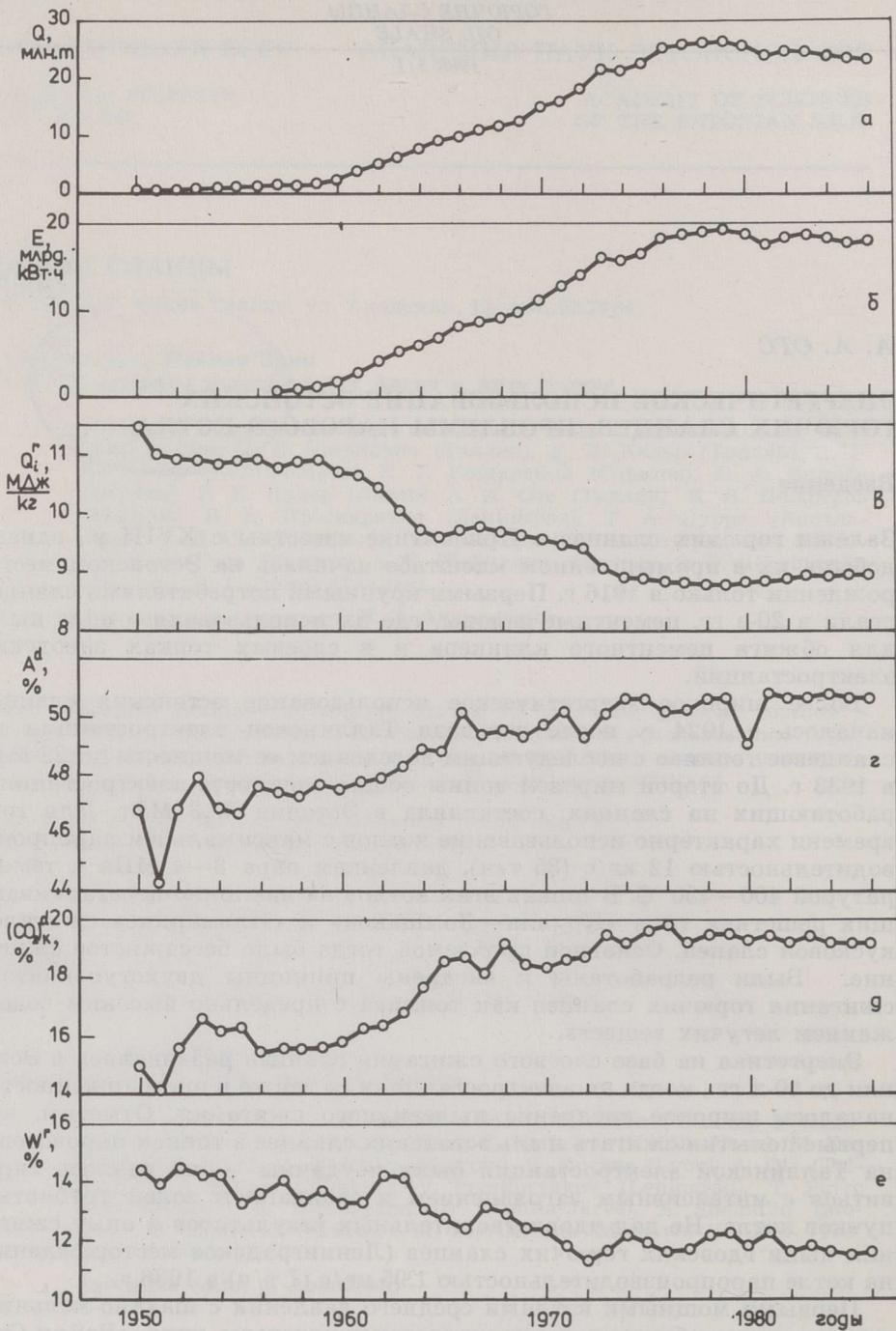


Рис. 1

Динамика использования сланцев для выработки электроэнергии (а) и производства электроэнергии (б), изменение теплоты сгорания рабочей массы (в), зольности (г), карбонатной  $CO_2$  (д) и влажности (е) сланцев по годам

Эксплуатация пылесланцевых котлов среднего давления показала, что проблемы горения здесь не имели первостепенной значимости: работу котлов лимитировало интенсивное загрязнение золовыми отложениями топочных экранов и пароперегревателей, а также коррозионно-абразивный износ труб водяных экономайзеров. Стало ясно, что котлы, сконструированные с учетом опыта сжигания каменных углей, не пригодны для эффективного и экономичного сжигания горючих сланцев как топлива с очень сложными свойствами минеральной и органической части.

Новый этап в развитии сланцевой энергетики начался в 1959 г., когда были введены в эксплуатацию первые агрегаты высокого давления на Прибалтийской ГРЭС. С этого времени эстонские горючие сланцы становятся важнейшим энергетическим сырьем для северо-запада СССР.

В настоящее время на Прибалтийской ГРЭС общей мощностью 1612 МВт работают 8 турбин по 100 МВт и 4 турбины по 200 МВт, а также термофикационная турбина мощностью 12 МВт. Полная мощность станции была достигнута в 1965 г. Добыча сланцев тогда составляла около 20 млн. т, причем почти половина сжигалась на электростанциях. В 1973 г. завершилось строительство Эстонской ГРЭС общей мощностью 1600 МВт с энергоблоками по 200 МВт.

На Прибалтийской ГРЭС установлено 18 котлов ТП-17 и 8 котлов ТП-67, имеющих паропроизводительность соответственно 61 и 89 кг/с (220 и 320 т/ч) при давлении перегретого пара 9,8 и 13,8/2,2 МПа и температуре 515 и 520 °С. На Эстонской ГРЭС установлено 8 двухкорпусных котлов ТП-101 паропроизводительностью 178 кг/с (640 т/ч) и с параметрами пара 13,8/2,2 МПа и 535/535 °С.

Динамика использования сланцев для выработки электроэнергии, производство электроэнергии и изменение технических характеристик сланцев по годам показаны на рис. 1. Максимальное количество электроэнергии на тепловых электростанциях, сжигающих сланцы, было выработано в 1979 г. — 19,1 млрд. кВт · ч. В последующие годы производство электроэнергии сократилось до 17—18 млрд. кВт · ч в год. Причина — изменение характера нагрузки энергоблоков (работа в маневренных режимах).

Основные трудности использования эстонских горючих сланцев как энергетического топлива связаны главным образом с влиянием их минеральной части на условия работы отдельных элементов парового котла.

Настоящая работа посвящена проблемам парового котла тепловых электростанций, сжигающих эстонские горючие сланцы, а также вопросам образования загрязняющих атмосферу компонентов в продуктах сгорания. Наряду с общими проблемами подробно рассмотрены вопросы работы паровых котлов, сжигающих сланцы в пылевидном состоянии. Низкотемпературное сжигание описано в статье И. П. Эпика\*.

### **Характеристика эстонских горючих сланцев как энергетического топлива**

Эстонские горючие сланцы, относящиеся к классу карбонатных сланцев, характеризуются как твердое топливо с высоким содержанием минерального вещества (60—70 % на сухую массу), умеренной влажностью (11—13 %) и низкой теплотой сгорания (низшая теплота

\* Эпик И. П. Низкотемпературное сжигание эстонских горючих сланцев // Горючие сланцы. 1985. Т. 2. № 3. С. 289—296.

сгорания рабочей массы 8,5—9 МДж/кг). Их можно условно рассматривать как породы, содержащие три составляющие: органическую, карбонатную и песчано-глинистую (таблицы 1 и 2).

Таблица 1

**Химический состав основных составляющих эстонских горючих сланцев, %**

Органическая		Карбонатная		Песчано-глинистая	
Компоненты	Содержание	Компоненты	Содержание	Компоненты	Содержание
C	77,45	CaO	53,5	SiO <sub>2</sub>	59,2
H	9,70	MgO	2,0	CaO	0,7
S	1,76	FeO	0,2	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16,3
N	0,33	CO <sub>2</sub>	44,3	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,8
O	10,01			TiO <sub>2</sub>	0,7
Cl	0,75			MgO	0,4
				Na <sub>2</sub> O	0,8
				K <sub>2</sub> O	6,3
				FeS	12,3
				SO <sub>3</sub>	0,5

Таблица 2

**Минералогический состав карбонатной и песчано-глинистой составляющей эстонских горючих сланцев, %**

Минерал	Содержание
<b>Карбонатная часть</b>	
Кальцит CaCO <sub>3</sub>	90,5
Доломит CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	9,2
Сидерит FeCO <sub>3</sub>	0,3
<b>Всего</b>	<b>100,0</b>
<b>Песчано-глинистая часть</b>	
Кварц SiO <sub>2</sub>	23,2
Рутил TiO <sub>2</sub>	0,7
Ортоклаз K <sub>2</sub> O·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·6SiO <sub>2</sub>	28,1
Альбит Na <sub>2</sub> O·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·6SiO <sub>2</sub>	5,8
Анортит CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·2SiO <sub>2</sub>	1,4
Гидромусковит [K <sub>1-x</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>x</sub> Al <sub>3</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> ] <sub>2</sub>	23,0
Роговая обманка [NaCa <sub>2</sub> Mg <sub>4</sub> (Fe,Al)Si <sub>8</sub> O <sub>22</sub> (OH) <sub>2</sub> ] <sub>2</sub>	2,0
Марказит FeS <sub>2</sub>	12,0
Лимонит Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·H <sub>2</sub> O	2,8
Гипс CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	1,0
<b>Всего</b>	<b>100,0</b>

Для органического вещества (ОВ) эстонских сланцев характерно высокое содержание водорода и кислорода и низкое — азота. Соотношение C/H примерно равно 8, что близко к значению C/H для жидких топлив. Из-за низкого соотношения C/H выход летучих веществ составляет 80—85 %. Особенность ОВ эстонских сланцев — то, что с ним связан хлор.

Основные компоненты карбонатной части — это кальцит (карбонат кальция) и доломит. При их разложении в процессе сгорания образуются оксиды кальция и магния и диоксид углерода. Главные компоненты песчано-глинистой части — кварц, ортоклаз, гидромусковит и марказит.

Соотношение между названными составляющими сланцев зависит от зольности топлива. Чем выше зольность, тем больше оксида кальция и меньше оксида кремния в минеральной части сланцев. Такие особенности распределения составляющих определяют и их сепарационные характеристики при размоле (имеется в виду деление как на размерные, так и на гравитационные фракции).

## Горение органического вещества и превращение минеральной части горючих сланцев в топке

Поскольку выход летучих веществ из эстонских сланцев очень высок, то разложение ОВ и бурное выделение летучих веществ начинаются уже при низких температурах (350—400 °С), чем обеспечивается стабильное горение сланцевой пыли в широком диапазоне изменения нагрузки котла.

В первом приближении процесс выгорания сланцевой пыли можно рассматривать как состоящий из двух последовательных стадий: выгорания выделяющихся из ОВ при термическом разложении летучих веществ и выгорания коксового остатка. Если считать, что эффективному значению степени выгорания сланцевой пыли соответствует стадия выгорания летучих веществ, то время их выгорания (вместе со стадией прогрева) в зависимости от конкретных условий составит не более 0,15—0,20 с. Выгорание летучих веществ в зависимости от температуры хорошо описывается законом Аррениуса при энергии активации  $E = 38,8$  кДж/моль и предэкспоненциальном множителе  $k_0 = 690$  л/с, в предположении, что скорость выгорания по отношению к концентрации кислорода имеет первый порядок.

Начиная от степени выгорания 0,80 интенсивность сгорания потока пыли существенно снижается. В зависимости от условий (концентрация кислорода, фракционный состав пыли и др.) время выгорания ококсованной пыли сланцев до степени выгорания 0,97—0,98 составляет примерно 0,5—0,8 с.

Кокс эстонских сланцев как пористый материал характеризуется коэффициентом внутренней диффузии при  $T_0 = 273$  К,  $D_{0,i} = 0,049$  см<sup>2</sup>/с (в предположении, что интенсивность диффузии кислорода пропорциональна температуре в степени 1,75). Кинетические характеристики кокса следующие:  $s_i k_0 = 1,857 \cdot 10^{10}$  см<sup>3</sup>/(г · с) и  $E = 100$  кДж/моль.

Газообразных продуктов неполного сгорания в продуктах сгорания сланцев практически нет ( $q_3 = 0$ ), углерода в шлаке обычно не более 0,2 %, а в летучей золе не более 0,1 %, вследствие чего механический недожог не превышает 0,3 %.

Физико-химические свойства золы и шлака, определяющие характер и интенсивность загрязнения и коррозии теплообменных поверхностей парового котла, формируются в ходе превращения минерального вещества топлива при горении. Основные параметры, определяющие поведение последнего, — температура горения и состав среды. Поскольку оба параметра можно в известных пределах варьировать при конструировании и эксплуатации топочных устройств, то процессы превращения минеральной части топлива также могут быть в известной степени управляемы.

От температуры в топочном пространстве прямо зависит глубина разложения первоначальных минералов минеральной части топлива на более простые соединения, а также условия химического соединения минералов между собой и с газовой средой, которое приводит к появлению разнотипных новообразований.

При термическом разложении в топочном процессе кальцита образуется один из активнейших компонентов сланцевой золы — оксид кальция. Часть его остается в свободном виде, часть соединяется с компонентами песчано-глинистой части, образуя клинкерные минералы, либо соединяется с серой.

Интенсивность улетучивания щелочных металлов (преимущественно калия) из сланцевой золы тоже сильно зависит от температуры, но при этом существенную роль играет и состав среды. В восстановительной среде соединения калия улетучиваются из сланцевой золы заметно

быстрее, чем в окислительной. Хлор в ходе горения сланцевой пыли улетучивается почти полностью.

Концентрация кислорода в топочном объеме влияет и на процессы превращения серы. Если она низка, то находящаяся в сланцах колчеданная сера (марказит) окисляется медленно и не до конца (это зависит и от температуры), способствуя таким образом образованию соединений железа и серы с низкими температурными характеристиками.

### Загрязнение золовыми отложениями поверхностей нагрева

Интенсивность загрязнения поверхностей нагрева паровых котлов при сжигании горючих сланцев зависит не столько от содержания мине-

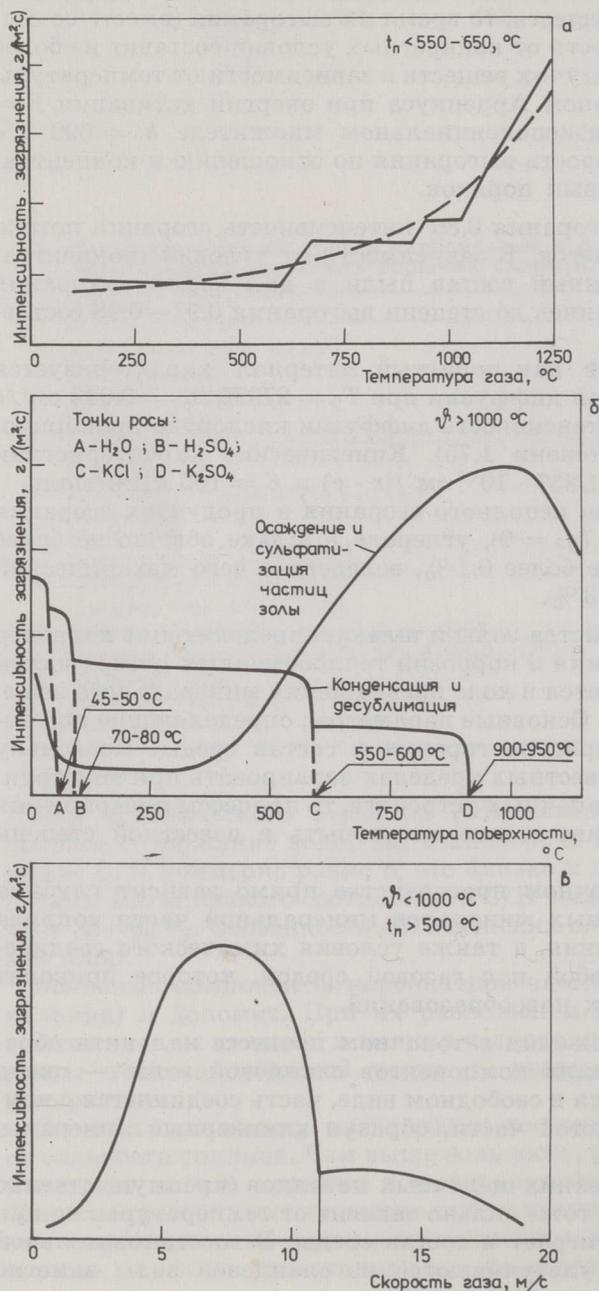


Рис. 2  
 Качественное влияние температуры продуктов сгорания сланцев (а), температуры поверхности, обтекаемой продуктами сгорания (внешняя поверхность отложений или труб — в отсутствие отложений) (б) и скорости потока (в) на интенсивность загрязнения поверхностей нагрева котла золовыми отложениями:  $t_n$  — температура поверхности,  $\nu_n$  — температура продуктов сгорания

ральной части в топливе, сколько от состава образующейся в топочном процессе золы (рис. 2). Важная особенность условий работы поверхностей нагрева — наличие на них связанных отложений, которые образуются в широком интервале температур продуктов сгорания и поверхностей нагрева. Влияние этих температур на интенсивность загрязнения тесно взаимосвязаны. Налицо явная тенденция к увеличению интенсивности загрязнения с повышением температуры продуктов сгорания. Так, резкое повышение интенсивности образования отложений, имеющее место при температуре продуктов сгорания 1000—1050 °С и выше, — это результат достижения температуры, при которой начинается быстрое увеличение количества частиц золы, присутствующих в потоке в размягченном и расплавленном виде, и их интенсивное прилипание к поверхностям нагрева.

В более низкотемпературных зонах главную роль в образовании отложений играет сульфатизация кальциевых соединений золы, в результате чего образуется сульфат кальция — основное вещество, связывающее отдельные частицы в плотные отложения. Процессы сульфатизации частиц золы наиболее интенсивны при температурах 800—950 °С. Отметим, что образование сульфата кальция приводит к связыванию частиц только в том случае, когда этот процесс происходит в слоях отложений, а не в потоке продуктов сгорания до осаждения. Высокое содержание в сланцевой золе свободного оксида кальция и взаимодействие его с оксидами серы — причина того, что сульфатсвязанные отложения можно встретить на поверхностях нагрева сланцевых котлов и при их работе при низких температурах (500 °С). Сульфатсвязанные отложения на базе сульфата кальция образуются вследствие сульфатизации не только свободного оксида кальция, но и содержащих его сложных золотых минералов. Связанный оксид кальция сульфатизируется медленнее, чем свободный.

Еще одна причина загрязнения поверхностей нагрева котла — конденсация соединений щелочных металлов. Непосредственно пары сульфата калия конденсируются при температурах продуктов сгорания выше 900—950 °С. Температура их конденсации зависит не только от общего содержания калия в топливе (при избытке оксидов серы), но и от глубины превращений содержащих калий минералов в процессе сгорания. Все это в конечном счете определяет и парциальное давление паров сульфата калия в продуктах сгорания. Интенсивная конденсация паров хлористого калия начинается при температуре 550—650 °С. Именно поэтому в нижних слоях отложений (где температурные условия благоприятнее) хлористого калия больше, чем в верхних. Конденсирующийся на поверхности хлористый калий под воздействием оксидов серы, содержащихся в продуктах сгорания, превращается в сульфат калия, который, подобно сульфату кальция, является веществом, связывающим отложения.

На рис. 2 наряду с прочим показаны точки росы паров серной кислоты (70—80 °С) и водяных паров (45—50 °С). Небольшая разница температур между ними и несоответствие первой содержанию горючей серы в сланцах обусловлены тем, что в топочном объеме и газоходах котла с золой связывается более 80 % серы, имеющейся в топливе. Вследствие низкой сернокислотной точки росы продуктов сгорания сланцев образование золотых отложений на низкотемпературных поверхностях и сернокислотная коррозия труб не имеют существенного значения.

Образование и интенсивность роста золотых отложений на конвективных поверхностях нагрева котла зависят не только от температурных условий, но и от уплотняющего и разрушающего воздействия частиц золы на отложения. Параметром, который при заданных усло-

виях лучше всего отражает эти воздействия, является скорость потока продуктов сгорания.

При малых скоростях потока интенсивность оседания частиц золы и разрушающее воздействие крупных частиц невелики. Малый износ и слабое изнашивающее действие крупных частиц обуславливаются довольно высоким содержанием химически инертной золы в отложениях, что препятствует взаимодействию и связыванию содержащихся в них активных компонентов. Это так наз. слабосвязанные отложения.

С увеличением скорости потока интенсивность оседания золы повышается, однако разрушающее действие крупных частиц золы нарастает еще быстрее. Поэтому скорость роста отложений после достижения ею максимума начинает резко падать из-за уменьшения количества нейтральных частиц золы, которое вызывается увеличением скорости потока.

Одновременно с падением интенсивности роста отложений в них увеличивается содержание активных компонентов золы и происходит упрочнение слоя. После достижения скоростью потока порогового значения (первая критическая скорость) образуются лишь плотные связанные отложения. При скорости, превосходящей пороговую, разрушающее действие частиц золы усиливается настолько, что в отложениях остаются лишь активные частицы, на базе которых и возникают прочносвязанные отложения. При еще больших скоростях потока (18—20 м/с) разрушающее действие золы усиливается до такого предела, что образование золовых отложений становится уже невозможным.

Отложения на трубах уплотняются под действием не только кинетической энергии крупных частиц, но и сил, воздействующих на отложения в циклах очистки поверхностей нагрева. В периоды между этими циклами происходит связывание некоторой части наиболее реакционно-способной золы с имеющимися на трубах отложениями. При очистке удаляется лишь та их часть, которая слабо связана с поверхностью, тогда как прочносвязанные остатки остаются на трубах. Силовое воздействие на отложения в цикле очистки, с одной стороны, удаляет основную массу наиболее слабосвязанных отложений, а с другой — способствует взаимодействию между оставшимися частицами золы в слое.

По окончании цикла очистки снова начинается рост слабосвязанных отложений (при скоростях ниже первой критической), остаток которых добавляется при очередной очистке к остаткам от предшествующих очисток и т. д. Таким образом слабосвязанные отложения под влиянием сил очистки поверхностей нагрева могут переходить в плотные отложения, слой которых непрерывно растет. Такой механизм образования плотных отложений характерен главным образом для топочных экранов и конвективных поверхностей нагрева сланцевых котлов.

### **Высокотемпературная коррозия и износ поверхностей нагрева**

Сланцевая зола не только вызывает образование быстрорастущих отложений на поверхностях нагрева котла, но и обладает очень высокой коррозионной активностью, которая обуславливается присутствием в отложениях и золе хлористого калия. Его содержание особенно высоко в первоначальных отложениях (более 20%). Под влиянием сланцевой золы применяемые в котлах стали корродируют заметно интенсивнее, чем в воздушной среде либо, например, в присутствии золы назаровского угля Канско-Ачинского бурогоугольного бассейна, в котором щелочных металлов мало, а хлор отсутствует вообще (рис. 3).

Относительное ускорение под влиянием золы и золовых отложений сланцев коррозии высоколегированной хромоникелевой аустенитной стали больше, чем в случае низколегированной перлитной, несмотря на то, что абсолютная величина коррозии в первом случае меньше. Такое поведение аустенитной стали вызвано особенно сильным воздействием хлоридов щелочных металлов на хром.

Коррозионная активность отложений зависит не только от содержания в них хлористого калия, но и от их структуры: интенсивность коррозии стали под плотными отложениями ниже, чем под рыхлыми.

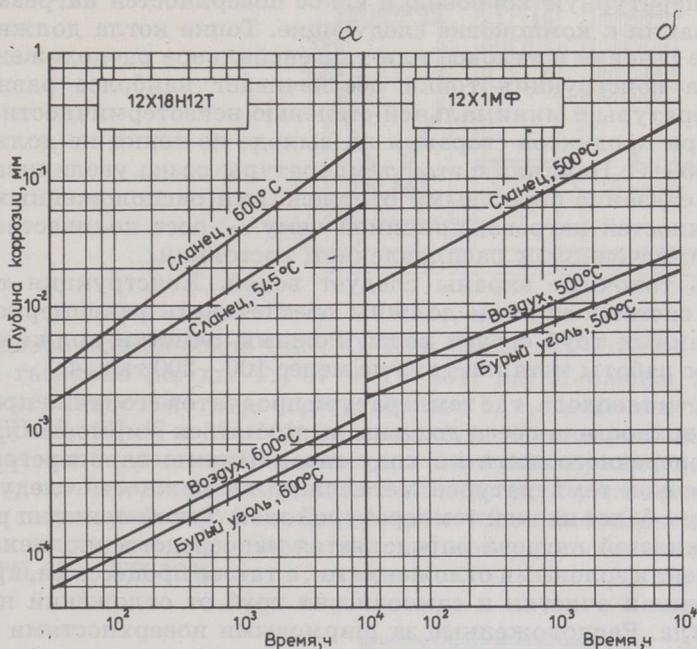


Рис. 3

Сравнительная диаграмма глубин коррозии аустенитной 12X18H12T (а) и перлитной 12X1МФ (б) стали в воздухе и под влиянием золы эстонских горючих сланцев и назаровского угля Канско-Ачинского бурогоугольного бассейна

Высокая коррозионная активность сланцевой золы — причина сильного износа поверхностей нагрева пылесланцевых котлов, в особенности высокотемпературных участков пароперегревателей.

Для стабилизации теплообмена современные паровые котлы оснащаются разнотипными очистными устройствами. Для паровых котлов, сжигающих горючие сланцы, проблема эффективной очистки поверхностей нагрева от золовых отложений из-за их быстрого нарастания имеет первостепенную важность. В циклах очистки имеет место не только отделение отложений золы от поверхности труб, но и повреждение защитной оксидной пленки на металле, что снижает ее диффузионное сопротивление и неизбежно приводит к интенсификации коррозии.

Уменьшить коррозионно-эрозионный износ поверхностей нагрева, вызванный действием очистки, можно либо увеличив периоды между циклами очистки, либо уменьшив силовое воздействие очистки на оксидную пленку. Отсюда следует, что хотя с интенсификацией очистки поверхностей нагрева котла интенсифицируется теплообмен, однако одновременно ускоряется и коррозионно-эрозионный износ труб. Это

усложняет задачу выбора оптимальных схем и режимов очистки поверхностей нагрева от золовых отложений, в частности выбора соотношения между интенсивностью очистки и условиями ее проведения. От решения этой задачи зависят в конечном итоге конструкция, режимы эксплуатации и технико-экономические показатели котла.

### Компоновка поверхностей нагрева котла

При выборе компоновки следует учитывать механизм загрязнения, высокотемпературную коррозию и износ поверхностей нагрева. Основные требования к компоновке следующие. Топка котла должна иметь квадратное сечение и угловое или тангенциальное расположение горелок. Такая конструкция топки обеспечивает наиболее равномерное поле температуры с минимальной степенью неизотермичности факела. Температура продуктов сгорания на выходе из топки не должна превышать 1050 °С. Начиная с этой температуры резко увеличивается загрязнение связанно-шлаковыми отложениями расположенных за топкой поверхностей нагрева, причиной чему — рост количества частиц золы в размягченном и расплавленном состоянии.

Очищать топочные экраны следует водой. Конструкция топочной камеры и система очистки должны обеспечивать равномерное обмывание экранных труб струей воды. Режимы очистки должны обеспечить ресурс работы металла труб не менее 100—200 тыс. ч.

В той части газохода, где температура продуктов сгорания превышает 500 °С, поверхности нагрева должны выполняться ширмовыми, с уменьшением поперечного шага по ходу газа. Ширмы пароперегревателей с более высокой температурой металла по возможности следует помещать в зону с более низкой температурой газа. Такой принцип размещения поверхностей нагрева определяется непосредственно механизмом их загрязнения золовыми отложениями, а также процессами, протекающими в циклах очистки и самоочистки труб от отложений при остановках котла. Расположенные за ширмовыми поверхностями трубные пучки желательно выполнять коридорными, с увеличенным шагом.

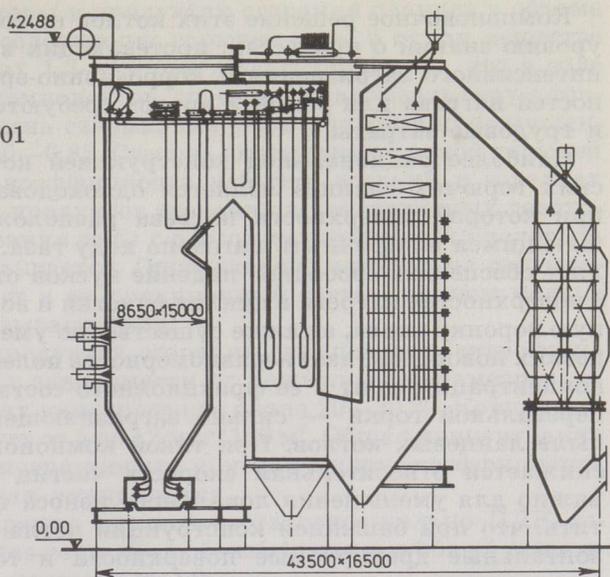
Все ширмовые поверхности нагрева должны быть цельносварными и по возможности располагаться горизонтально (поперечнообтекаемо в отношении потока газа). Горизонтальные поверхности легко дренируются (что особенно важно для маневренных энергоблоков) и имеют более компактную конструкцию, а некоторое увеличение интенсивности загрязнения этих поверхностей по сравнению с продольнообтекаемыми (разница в интенсивности загрязнений меньше при цельносварных конструкциях) компенсируется применением более эффективных методов очистки.

Для очистки поверхностей нагрева от золовых отложений при сжигании сланцев при температурах металла выше 400—440 °С наиболее эффективен комбинированный метод, когда газоимпульсная или виброочистка сочетается с водяной обмывкой. Режимы очистки, которые выбирают исходя из характеристик высокотемпературной коррозии сталей под влиянием золы и золовых отложений сланцев, должны обеспечить срок эксплуатации высокотемпературных участков труб поверхностей нагрева (температура металла выше 500 °С) не меньший, чем 40—50 тыс. ч.

При проектировании и эксплуатации сланцевых котлов необходимо учитывать динамику загрязнения, то есть изменение тепловосприятости поверхностей нагрева во времени из-за непрерывного нарастания золовых отложений на трубах.

Разработанные в конце 50-х—начале 60-х гг. и работающие на Прибалтийской и Эстонской ГРЭС паровые котлы характеризуются

Рис. 4  
Пылесланцевый котел ТП-101



многоходовой компоновкой (рис. 4). При такой компоновке в горизонтальном газоходе (котлы ТП-67 и ТП-101) расположены поперечнообтекаемые ширмовые пароперегреватели, а в нисходящем газоходе (котлы ТП-17, ТП-67 и ТП-101) — продольнообтекаемые ширмы пароперегревателя с постоянным шагом. Экономайзерные поверхности нагрева размещаются в восходящем газоходе. Для уменьшения интенсивности загрязнения труб экономайзера в более высокотемпературной зоне газа часть его выполнена в виде поперечнообтекаемых ширм (котлы ТП-67 и ТП-101).

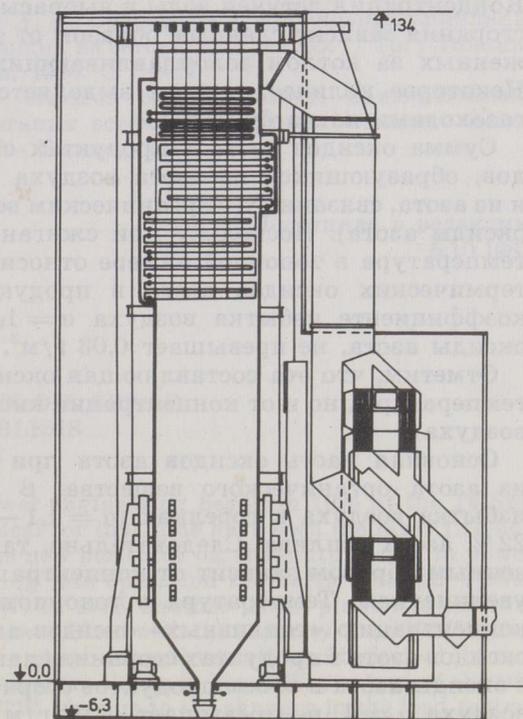


Рис. 5  
Пылесланцевый котел башенной конструкции для энергоблока мощностью 500 МВт

Компоновочное решение этих котлов не соответствует современному уровню знаний о процессах, протекающих в сланцевых котлах. Из-за интенсивного загрязнения и коррозионно-эрозионного износа поверхностей нагрева для ремонта котлов требуются большие материальные и трудовые затраты.

Наиболее рациональной конструкцией котла для сжигания эстонских горючих сланцев является одноходовая башенная компоновка, при которой поверхности нагрева расположены с постоянно уменьшающимся поперечным шагом по ходу газа. Такая компоновка позволяет обеспечить свободное падение кусков отложений, отрывающихся с поверхностей нагрева в циклах очистки и во время остановок, в холодную воронку котла, а также существенно уменьшить (ввиду отсутствия резких поворотов газа) неравномерность полей скоростей, температуры, концентрации золы и ее фракционного состава. Кроме того, здесь нет перевальной горки — сильно загрязняющегося элемента нынешних пылесланцевых котлов. При такой компоновке поверхностей нагрева снижается относительная скорость частиц золы в потоке газа, что важно для уменьшения локального износа труб. Следует также отметить, что при башенной конструкции котла легко komponуются горизонтальные дренаруемые поверхности и топочная камера квадратного поперечного сечения.

На рис. 5 представлен разработанный в Таллинском политехническом институте эскиз башенного котла для сжигания эстонских сланцев для энергоблока мощностью 500 МВт.

### Загрязняющие атмосферу компоненты продуктов сгорания

Это следующие компоненты: оксиды азота и серы, канцерогенные полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) и летучая зола. Концентрация летучей золы в выбрасываемых в атмосферу продуктах сгорания зависит главным образом от эффективности работы расположенных за котлом золоулавливающих устройств (электрофильтров). Некоторое количество золы выделяется и через расположенные под газоходами котла бункеры.

Сумма оксидов азота в продуктах сгорания складывается из оксидов, образующихся из азота воздуха («термические» оксиды азота), и из азота, связанного с органическим веществом топлива («топливные» оксиды азота). Поскольку при сжигании эстонских горючих сланцев температура в топочной камере относительно низка, то концентрация термических оксидов азота в продуктах сгорания с объемом при коэффициенте избытка воздуха  $\alpha = 1$ , как количество связанного в оксиды азота, не превышает  $0,03 \text{ г/м}^3$ .

Отметим, что эта составляющая оксидов азота зависит не только от температуры, но и от концентрации кислорода (коэффициента избытка воздуха).

Основная часть оксидов азота при сжигании сланцев образуется из азота органического вещества. В зависимости от коэффициента избытка воздуха в горелках ( $\alpha = 1,1—1,35$ ) в оксиды переходит 12—22 % азота топлива. Следовательно, такой процесс конверсии существенным образом зависит от концентрации кислорода и нарастает с ее увеличением. Температура в топочном пространстве мало влияет на концентрацию «топливных» оксидов азота. Суммарная концентрация оксидов азота в продуктах сгорания сланцев, как количество связанного в оксиды азота в объем продуктов сгорания при коэффициенте избытка воздуха  $\alpha = 1$ , не превышает  $0,09 \text{ г/м}^3$ .

Концентрация оксидов серы в продуктах сгорания сланцев в объеме при  $\alpha = 1$  и при среднем содержании горючей серы в сухом веществе 1,6 % находится в пределах 1,3—1,5 г/м<sup>3</sup>. Благодаря тому, что в золе эстонских сланцев много компонентов, способных связывать серу в топке и газоходах котла, степень связывания серы с золой в промышленных котлах составляет 0,80—0,85. Степень связывания с золой горючей серы отчасти зависит от коэффициента избытка воздуха в горелках и от средней температуры продуктов сгорания в конвективных газоходах котла. Степень связывания серы с ростом концентрации кислорода в продуктах сгорания повышается. Определенное влияние на связывание серы с золой оказывает и ее фракционный состав, причем мелкие фракции золы лучше связывают серу.

Концентрация ПАУ в продуктах сгорания сланцев за электрофильтрами котлов составляет, в зависимости от режимных параметров, от 350 до 550 мкг/100 м<sup>3</sup>, из них канцерогенны около 20—30 %. Концентрация бенз(а)пирена варьирует от 5 до 12 мкг/100 м<sup>3</sup>. Общая концентрация ПАУ, в том числе и канцерогенных, с увеличением коэффициента избытка воздуха в горелках уменьшается.

Относительная концентрация оксидов азота относительно ПДК несколько ниже, чем у оксидов серы. Доля бенз(а)пирена в общей относительной концентрации не превышает 1 %.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Эпик И. П. Влияние минеральной части сланцев на условия работы котлоагрегата. — Таллин, 1961.
2. Отс А. А. Процессы в парогенераторах при сжигании сланцев и канскоачинских углей. — Москва, 1977.
3. Отс А. А. Коррозия и износ поверхностей нагрева котлов. — Москва, 1987.
4. Эпик И. П. Прямое сжигание эстонских горючих сланцев на тепловых электростанциях полупиковой нагрузки // Горючие сланцы. 1985. Т. 2. № 1. С. 69—81.
5. Отс А. А., Арро Х. Х., Таллермо Х. Й., Сууркууск Т. Н. Основные принципы проектирования котлов, работающих на эстонских сланцах // Тр. / Таллин. политехн. ин-т; № 546. Таллин, 1983. С. 3—24.
6. Лоосаар Ю. М. Образование окислов серы и азота, канцерогенных веществ при пылевидном сжигании эстонских горючих сланцев: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Таллин, 1987.

Таллинский политехнический институт

Поступила в редакцию  
6.10.1987

А. А. ОТС

## UTILIZATION OF THE ESTONIAN OIL SHALE IN POWER ENGINEERING. PROBLEMS CONCERNING A STEAM BOILER

The use of Estonian oil shale in power engineering began in 1924 at the Tallinn Thermal Power Plant. The most typical for that time have been the layer fire-box steam boilers on sloping grates. The new period of oil shale utilization in power engineering began in 1959 by putting into operation the Baltic Thermal Power Plant with the capacity of 1,612 MW. In 1973, another power plant was put into operation — the Estonian Thermal Power Plant with the capacity of 1,600 MW. The amount of oil shale, the output of electric power and variation of technical characteristics of shale, according to the years, are shown in Fig. 1. The output of electric power was maximum in 1979—19.1 TW · h. Due to the changes in the load regime

of power plants (manoeuvrable regime), the output of electric power has decreased in the last years, reaching 17—18 TW · h a year.

The Estonian oil shale has been characterized as a fuel with high content of mineral matter (60—70 % per dry mass). The net calorific value varies within 8.5—9 MJ/kg (moisture content 11—13 %). A high content of hydrogen (9.70 %) and oxygen (10.01 %) and low content of nitrogen (0.33 %) are most typical for the organic matter of Estonian oil shale. The chlorine (0.75 %) combined with the organic matter of shale is one of the peculiar features of the latter.

The Estonian oil shale's mineral matter consists of the sandy-clay and carbonate parts. The basic components of the sandy-clay part are quartz, orthoclase, hydro-mica and markasite. The carbonate part consists basically of calcite and dolomite (Tables 1 and 2).

Due to the high content of volatile matter in oil shale and their intensive output a stability combustion of pulverized oil shale is provided within a wide range of the change in the boiler loading.

The major problem in the operation of pulverized oil shale steam boilers is the intensive fouling of the furnace wall tubes and convective heating surfaces with bounded ash deposits, as well as their high temperature corrosion and wear.

The fouling intensity of the boilers' heating surfaces, while burning oil shale, is associated not only with the high content of mineral matter of the fuel, but mostly with the complicated composition of ash, which is formed in the course of the burning process.

Quantitative characteristics of the effect of most important parameters on fouling are: the flue gas temperature, the temperature of the surface (an outer surface of deposits or heating surfaces tubes in case of the absence of the deposits) and the velocity of flue gas (Fig. 2).

Starting from the flue gas temperature of 1000—1050 °C, a significant increase in the intensity of the deposit formation appears to be the result of the fast increase of the amount of ash particles in a softened and melted form. In the region of lower temperature, the processes of the ash particles sulphation on heating surfaces lead to the formation of bounded deposits. The sulphate bounded deposits may be found on heating surfaces even at 500 °C. The condensation of the alkali metals compounds is of great importance for the processes of the fouling boilers' heating surfaces. The dew point of potassium sulphate is in the range of 900—950 °C, for potassium chloride within 550—650 °C. Being condensed on the surface, the potassium chloride in time under the influence of sulphur oxides in combustion products transforms into potassium sulphate. Potassium sulphate, as well as calcium sulphate, is a bonding substance of deposits.

Oil shale ash induces not only the formation of fastgrowing deposits on boiler heating surfaces, but it also possesses a very high corrosion activity. The main reason for such high corrosion activity lies in the presence of potassium chloride in oil shale fly ash. A relative accelerating impact of oil shale ash on chrome-nickel steel is more vivid than on perlitic one. The wear of high-temperature heating surfaces is also associated with high temperature corrosion. A periodic destruction of protective oxide film on metals diminishes its diffusion resistance and inevitably brings about the intensity of corrosion.

The steam boilers operating at the Baltic and Estonian Thermal Power Plants are characterized by a multi-pass arrangement, where the separate type of heating surfaces is located in defferent gas-passes (Fig. 4). The arrangement of these boilers does not correspond to the modern data on the fouling and corrosion processes occurring in Estonian oil shale boilers. The most optimal design a boiler, burning oil shale, is a single pass tower-type arrangement (Fig. 5). Such an arrangement of the boiler ensures the layout of heating surfaces with a constantly decreasing transverse spacing along the gas pass, the free fall of lumps of the deposits during cleaning cycles and outlet from heating surfaces into ash hopper of the boiler and also unevenness of fields of flue gas velocity, temperature, ash concentration and its fractional composition.

The paper reports also data about the concentration of nitrogen and sulphur oxides and cancerogenous polycyclic aromatic hydrocarbons in the flue gas of Estonian oil shale.