

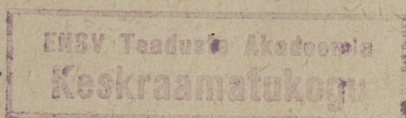
Er 6.7

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED  
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА  
Серия А № 64 1955

И. П. ЭПИК  
КАНД. ТЕХН. НАУК

О ПРОЕКТИРОВАНИИ КОТЕЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ  
С УЧЕТОМ ПРОЦЕССОВ СПЕКАНИЯ ЛЕТУЧЕЙ ЗОЛЫ  
СЛАНЦА-КУКЕРСИТА

P20727



ЭСТОНСКОЕ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО  
ТАЛЛИН 1955





## ВВЕДЕНИЕ

Важной проблемой при эксплуатации котлоагрегатов на эстонском горючем сланце (сланце-кукерсите) является борьба с загрязнением поверхностей нагрева. Шлакование топочных экранов и спекание летучей золы в области конвективных поверхностей нагрева особенно вредно действуют в случае пылевидного сжигания сланца, при высоких тепловых нагрузках поверхностей нагрева и при повышенных параметрах пара.

Наиболее крупные котлоагрегаты на эстонском горючем сланце вынуждены работать с периодической обдувкой через каждые 2—3 часа, сокращением безостановочной работы до 3—4 недель и увеличением простоев на чистки, а чаще всего, с паропроизводительностью, сниженной до 60—70% от проектной. Отсутствие представления о процессах спекания летучей золы эстонского горючего сланца не дало возможности при проектировании котлоагрегатов найти более рациональные компоновочные решения для поверхностей нагрева, обеспечивающие их нормальную эксплуатацию.

Учитывая вышеуказанное в Таллинском политехническом институте были проведены исследования для выявления физико-химического характера процессов спекания летучей золы эстонского горючего сланца, а также основных условий спекания отложений летучей золы.

### 1 ПРОЦЕССЫ СПЕКАНИЯ ЛЕТУЧЕЙ ЗОЛЫ ЭСТОНСКОГО ГОРЮЧЕГО СЛАНЦА

Исследованием Б. Торпана [1] установлено, что минеральная часть эстонского горючего сланца состоит, в основном, из карбоната кальция (~64%), кварца (~8,5%),

ортоклаза (~8,5%). Кроме того имеет место наличие пирита (~3,1%), карбоната магния (~1,9%), слюды (~6,5%) и глинистых примесей (~5,6%). Такая смесь при дроблении и размоле может разделиться на весьма различные по своему составу частицы.

Для толкования процессов шлакования и спекания летучей золы эстонского горючего сланца в топочно-газовой системе котла, являются существенными два обстоятельства:

1. Наличие в сланцевой пыли механически сепаратных частиц органической массы с зольностью порядка 10% (против 40—50% в обычном сланце). Зола этих концентратов органической массы имеет силикатный характер (карбонатов в золе имеется лишь около 10%, против обычных 60—65%) и является весьма легкоплавкой

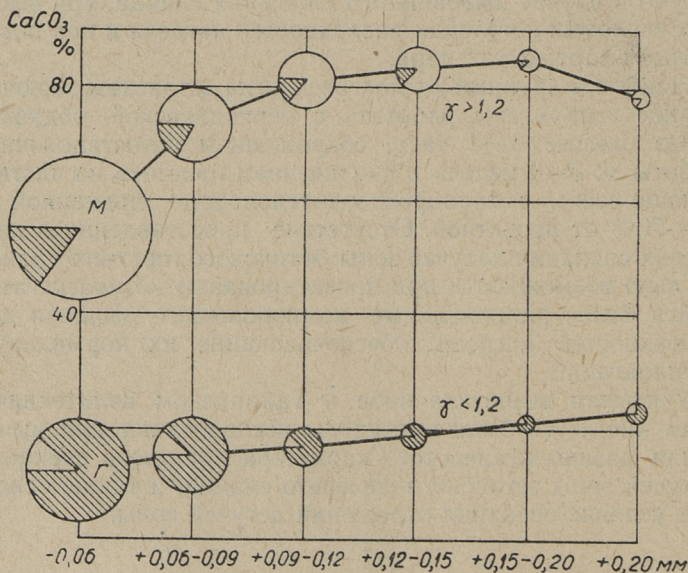


Рис. 1 — Содержание карбоната кальция ( $\text{CaCO}_3$ ) в минеральной части различных фракций сланцевой пыли ( $R_{88}=20,2\%$ ). Полученные путем просеивания отдельные классы фракционированы по удельному весу (уд. вес ниже и выше  $1,2 \text{ г/см}^3$ ). Выход фракций и содержание в них горючей массы ( $\gamma$ ) и минеральной части ( $M$ ) обозначены относительными площадями кружков и секторов.



( $t_1 = 1050-1070^\circ$ ,  $t_2 = 1145-1150^\circ$  и  $t_3 = 1165^\circ$ ). В зависимости от тонкости помола пыли получен выход такой сепаратной золы порядка 3—8% от общей золы сланца.

2. Наличие в сланцевой пыли механически сепаратных частиц карбоната кальция. Вследствие рассеянного состояния пыли в топочной камере, значительная часть образовавшейся из карбоната кальция извести не вступает в реакцию с силикатами золы. В результате этого в летучей золе остается значительное количество т. н. свободной извести. Содержание свободной извести в летучей золе пылевидного котла равно 13—19%.

Характерная диаграмма разделения пыли эстонского горючего сланца представлена на рис. 1.

### Действие сепаратных легкоплавких частиц золы

Для средних проб золы эстонских горючих сланцев характерны сравнительно высокие температуры начала деформации, размягчения и жидкоплавкого состояния:  $t_1 = 1145-1400^\circ$ ,  $t_2 = 1250-1500^\circ$  и  $t_3 = 1300-1500^\circ$ . Однако разделение вышеуказанных легкоплавких частиц в процессе размола вызывает наличие отдельных липких пылинок уже начиная с температуры  $1050^\circ$  и наличие отдельных жидких капель шлака при температурах выше  $1150^\circ-1165^\circ$ . При обычных методах определения плавкости золы влияние этих легкоплавких частиц остается незаметным из-за тугоплавкой основной карбонатной массы сланцевой золы. Отличающимся, однако, является положение в процессе топки, где пыль и летучая зола находятся в газах в рассеянном виде.

Для проверки шлакуемости летучей золы в процессе горения, где факторы концентрации и времени отличаются от условий, которые существуют при обычных лабораторных методах определения плавкости, была построена лаборатория газо-пылевая топка. Вертикальная топка, длиной в 1 м и диаметром в 100 мм имеет верхнее расположение газо-пылевой горелки (рис. 2). В топку устанавливалась горизонтальная фарфоровая трубка с наружным диаметром равным 17 мм. В трубку была введена термопара. Степень спекаемости осевшей на трубку летучей золы определялась обдуванием охлажденной трубки в специальном обдувочном канале. Тепловое соотношение сжи-

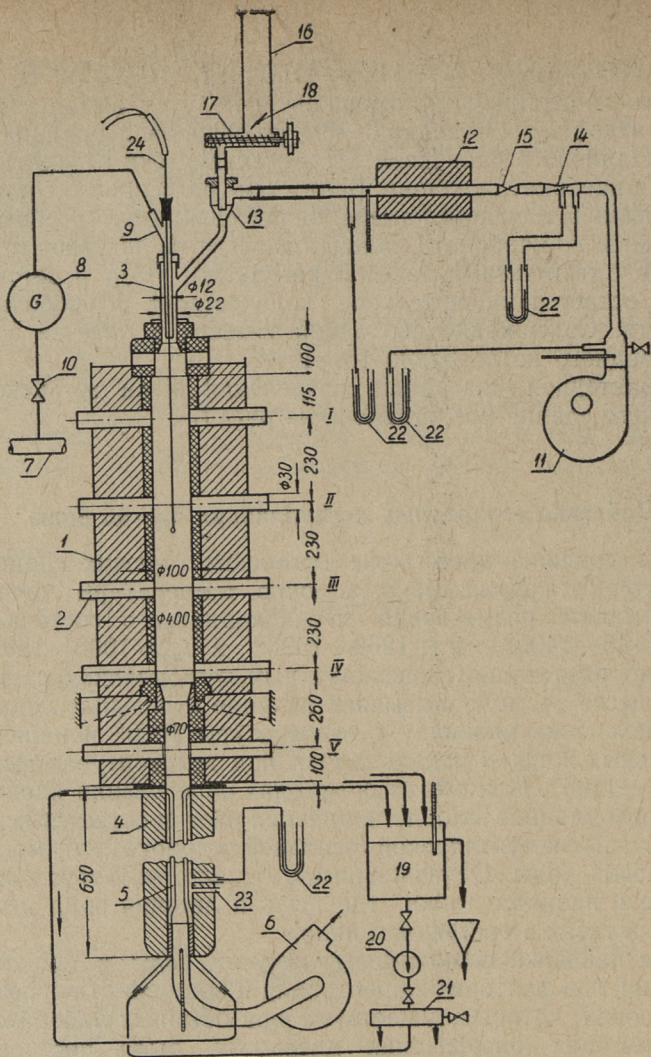


Рис. 2 — Лабораторная газо-пылевая топка для исследования спекания летучей золы. 1 — топка, 2 — гляделки, 3 — горелка, 4 — охладитель, 5 — поверхность нагрева охладителя, 6 — дымосос, 7 — газопровод, 8 — газовый счетчик, 9 — газопровод горелки, 10 — кран, 11 — дутьевой вентилятор, 12 — воздухоподогреватель, 13 — конус питателя пыли, 14 — расходомер, 15 — кран, 16 — бункер пыли, 17 — шнековый питатель пыли, 18 — смеситель, 19 — бак воды, 20 — насос, 21 — коллектор воды, 22 — тягомеры, 23 — штуцер газоанализатора, 24 — термомпара.



гаемых бытового газа и сланцевой пыли при опытах было 4 : 1. Сжигаемый сланец имел следующую характеристику плавкости золы:  $t_1 = 1150^\circ$ ,  $t_2 = 1250^\circ$  и  $t_3 = 1300^\circ$ .

Опытами установлено:

1. При  $1150^\circ$  и выше отложения летучей золы являются сплавленными и не удаляются сдуванием. К. п. д. сдувания:

$$\eta = \frac{\text{вес сдутой с трубы золы}}{\text{первоначальный вес отложения}} = 0.$$

2. В температурном интервале  $1050—1150^\circ$  отложения летучей золы неполностью удаляются сдуванием. К. п. д. сдувания:  $0 < \eta < 100\%$ . При этом динамический напор обдувочной струи был доведен до  $715 \text{ кг/м}^2$ .

3. Отложения при температурах ниже  $1050^\circ$  полностью удаляются сдуванием. К. п. д. сдувания:  $\eta = 100\%$ .

Сдуваемость отложений летучей золы в зависимости от температуры показана на рис. 3. Важно отметить, что необходимый для полного сдувания динамический напор струи увеличивается приблизительно в 20 раз при повышении температуры отложения с  $900^\circ$  по  $1050^\circ$  (с 20 до  $380 \text{ кг/м}^2$ ). Такое увеличение плотности отложений может быть объяснено наличием малого количества отдельных частиц золы, размягчение которых начинается уже около  $900^\circ$ , или реакциями между свободной известью и силикатами, которые при этих температурах протекают в твердых фазах.

### Действие свободной извести золы

Если вредное действие легкоплавких сепаратных частиц пыли начинается с  $1050^\circ$  и имеет место выше этой температуры, то вредное действие свободной извести летучей золы имеет место, в основном, при температурах ниже  $800—900^\circ$ .

В процессе пылевой топки карбонат кальция ( $\text{CaCO}_3$ ) золы разлагается полностью, отделяя углекислый газ ( $\text{CO}_2$ ). Содержание окиси кальция ( $\text{CaO}$ ) в золе энергетического сланца-кукерсита равно в среднем 35—45%. Часть его соединяется в топочном процессе с силикатной частью золы, а приблизительно 35—50% извести покидает топку в нереагированном виде. Летучая зола содержит, таким образом, свободную известь ( $\text{CaO}$ ).

Динамический напор  
обдувочной струи у  
поверхности нагрева,  
 $H \text{ кг/м}^2$

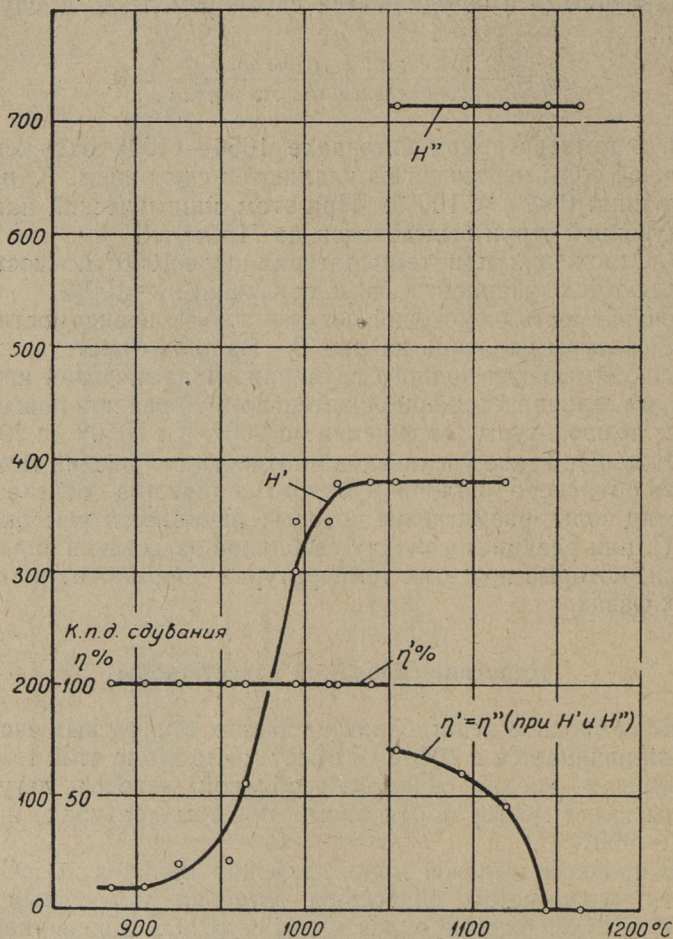
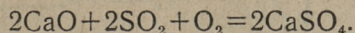


Рис. 3 — Зависимость сдуваемости от температуры.



В отложениях летучей золы, под влиянием сернистого газа, содержащегося в газовых продуктах сгорания, в определенных условиях протекает реакция:



В результате этого, отложение летучей золы спекается. Такие кристаллические спекшиеся отложения летучей золы эстонского горючего сланца имеют значительную прочность: их прочность на сжатие в среднем равна  $100\text{--}200 \text{ кг/см}^2$ , а в отдельных слоях отложения она доходит до  $1000 \text{ кг/см}^2$ . Такие отложения уже не удаляются обдувкой. Нередко приходится после 2—3-недельной работы останавливать котел для вырубки газоходов.

Для сравнения химического состава спекшихся отложений летучей золы и исходного сланца приводим нижеследующие цифры:

Наименование	Содержание CaO, %		Содержание SO <sub>3</sub> , %
	общее	«свободная» известь	
Сланцевая зола . . . . .	35—45	—	0,1—0,2
Летучая зола из циклона пылевого котла . . . . .	36,2—40,3	13,7—18,5	3,6—4,8
Спекшиеся кристаллические отложения . . . . .	22,1—34,3	следы—1,0	24,4—44,7

Изучение структуры золовых отложений производилось путем термографического физико-химического исследования. Сульфатные соединения определяются при термографическом исследовании главным образом термическими эффектами дегидратизации при сравнительно низких температурах (около  $100\text{--}300^\circ$ ). Так как образование основной части золовых отложений происходит при более высоких температурах, то понадобилась предварительная гидратизация исследуемых проб путем обработки дистиллированной водой. На рис. 4 изображена характерная термограмма для спекшихся золовых отложений на конвективных поверхностях нагрева пылевого котлоагрегата. Термограмма указывает на эндотермические эффекты дегидратизации гипса ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) при температурах  $130^\circ$  и  $185^\circ$ . В качестве сравнения приведена термограмма летучей золы, взятой из бункера циклона, на которой виден глубокий эндотермический эффект дегидратизации

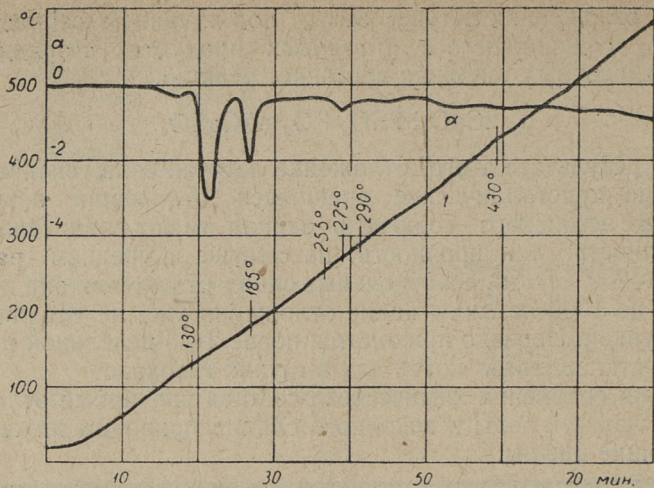


Рис. 4 — Термограмма спекшегося отложения на конвективной поверхности нагрева. Проба гидратизирована. Свободная известь отсутствует, содержание  $SO_3 = 26,85\%$ .



Рис. 5 — Термограмма летучей золы из батарейного циклона пылевого котлоагрегата. Проба гидратизирована. Содержание свободной извести равно  $17,0\%$ .



гидроокиси кальция при  $480^{\circ}$  (рис. 5). Это указывает на наличие свободной извести в летучей золе, на базе которой и образовался сульфат кальция.

На многих термограммах спекшихся отложений видны также эндотермические эффекты, которые указывают на наличие в отложениях, вместе с сульфатами кальция, также и калие-кальциевых сульфатов (дегидратизация и разложение сингенита,  $\text{CaSO}_4 \cdot \text{K}_2\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , при  $275^{\circ}$  и  $430^{\circ}$ ). Необходимо отметить, что тепловые эффекты с дегидратизацией и разложением сингенита увеличиваются в зависимости от времени пребывания отложения в газоходе. При этом увеличивается и содержание окиси калия ( $\text{K}_2\text{O}$ ) в отложениях. Наибольшее содержание окиси калия, до 17%, было установлено в наружных слоях отложений, взятых с поверхностей нагрева слоевых котлов. Время пребывания отложений в газоходе было 5—6 недель. Кроме того, дальнейшие исследования показывают, что содержание окиси калия и величина соответствующих эффектов на термограммах не связаны с увеличением прочности сульфатных отложений. Таким образом, скопление окиси калия не может быть определяющим фактором спекания отложений летучей золы.

Пробы, взятые из различных мест газового тракта, указывают, что спекание из-за образования сульфатов кальция прекращается там, где температура газов ниже  $500$ — $520^{\circ}$ . На сравнительно холодных стенках кипятильных труб (температура кипения  $230$ — $240^{\circ}$ ) слои отложений, прилегающие непосредственно к поверхности, показывают содержание свободной извести. В то же время в нагруженных слоях свободная известь отсутствует. Это указывает на то, что низкие температуры поверхностей нагрева также не способствуют процессам спекания.

Образование сульфата кальция в газоходах происходит в условиях весьма низкого парциального давления сернистого газа ( $\text{SO}_2$ ). Исходя из баланса серы в исходном сланце, топочном шлаке и летучей золе, можно расчетным путем определить, что парциальное давление  $\text{SO}_2$  в дымовых газах равно  $1$ — $1,7$  мм рт. ст.

В таких условиях верхний предел области синтеза  $\text{CaSO}_4$  должен быть около  $800^{\circ}$ , так как при  $800$ — $900^{\circ}$  парциальное давление  $\text{SO}_2$ , как продукта разложения  $\text{CaSO}_4$ , начинает превышать  $1$ — $2$  мм рт. ст. (2). Наличие

же спекшихся сульфатных отложений в области таких поверхностей нагрева, где температура газов выше  $\sim 800^\circ$ , объясняется охлаждающим действием поверхности нагрева на отложение летучей золы.

Спекание летучей золы сланца кукуерсита на хвостовых поверхностях нагрева, где температура отложений ниже  $500^\circ$ , происходит в тех случаях, когда золотые заносы подвергаются воздействию влаги. Наличие влаги чаще всего вызывается течью в экономайзерах или достижением точки росы в дымовых газах вследствие глубокого их охлаждения. Под действием влаги происходит процесс цементации летучей золы в виде образования гидросиликатов кальция на базе свободной извести и сепаратной силикатной части в летучей золе. На термограммах таких проб, без предварительной обработки водою, виден характерный затянутый эндотермический эффект выделения адсорбционной воды гидросиликатов кальция в диапазоне температур  $100\text{—}300^\circ$  (рис. 6).

### Температурные диапазоны характерных процессов спекания летучей золы

Как указывалось выше, характер процессов спекания летучей золы эстонского горючего сланца в топочно-газотходной системе определен температурами золотых заносов. В заключение отметим температурные границы областей с определенным характером загрязнения поверхности нагрева.

1. Область действия жидких частиц летучей золы, при температурах:

$$t \geq 1150^\circ.$$

2. Область действия пластических частиц летучей золы, при температурах:

$$1050^\circ \leq t < 1150^\circ.$$

3. Область налипания и «слабого спекания» летучей золы, при температурах:

$$900^\circ < t < 1050^\circ.$$

4. Область спекания из-за образования  $\text{CaSO}_4$ , при температурах:

$$\sim 500^\circ < t < 800^\circ\text{—}900^\circ.$$



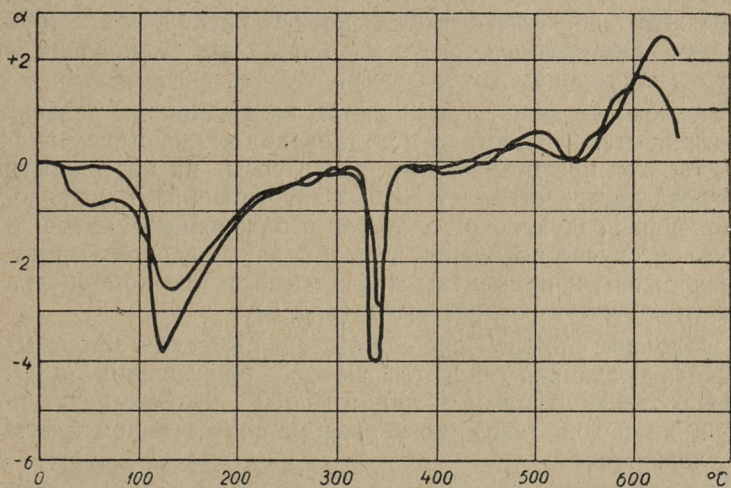
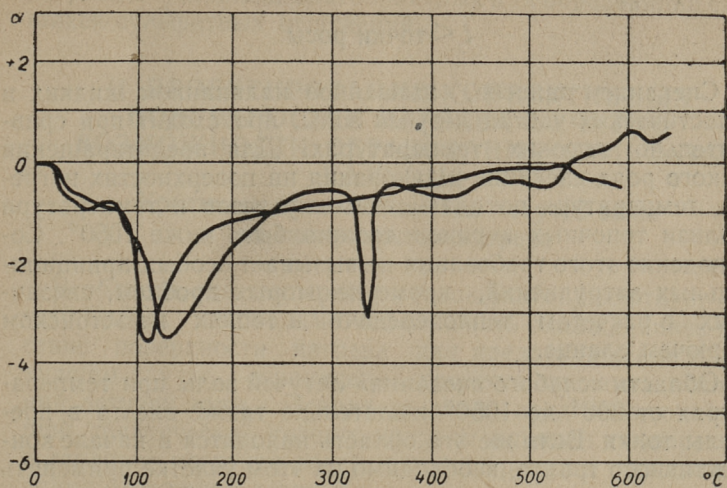


Рис. 6 — Термограммы отложений, зацементированных на низкотемпературном участке воздухоподогревателя.

5. Область цементации под действием влаги, при температурах:

$$t < \text{точки росы.}$$

Спекание заносов, вызванное налипанием жидких и пластических частиц летучей золы, происходит при сравнительно высоких температурах. Для предотвращения такого рода спекания-шлакования на поверхностях нагрева, температура покидающих топку газов и температура вблизи топочных экранов должна быть ниже  $1050^{\circ}$ . Соблюдение этого требования не вызывает особых принципиальных затруднений, кроме некоторых проблем, связанных с расчетом теплопередачи в топках на эстонском горючем сланце.

Область «слабого спекания» летучей золы при температурах от  $900^{\circ}$  до  $1050^{\circ}$  желательнее также внести в пределы топки. Если же эта область находится в начале конвективного тракта, необходимо на этом участке применить крупносопловые обдувочные приборы, обеспечивающие напор струи у поверхности труб не менее  $300\text{--}400 \text{ кг/м}^2$ . При этом необходимо иметь редкое расположение труб пучка. Обдувочные струи должны быть направлены к боковым сторонам труб, косо по ходу газов.

Несложным вопросом является избежание в пределах котлоагрегата области цементации под воздействием влаги, так как предотвращение точки росы на поверхности нагрева не представляет особых затруднений. Для предохранения воздухоподогревателей и батарейных циклов от воды, в случае появления течи в водяных экономайзерах, предложены и применены правильные схемы компоновки хвостовой части котлоагрегата (3, 4, 5).

Наиболее сложной проблемой при сжигании эстонских горючих сланцев является вопрос образования  $\text{CaSO}_4$  между температурами  $\sim 500^{\circ}$  и  $\sim 800^{\circ}$ . Этот температурный диапазон газов неизбежен на конвективном тракте котлоагрегата.

Борьба со спеканием отложений летучей золы в этой области производится, главным образом, при помощи частой обдувки (2—4 раза за смену), встряхиванием поверхностей нагрева, разрядкой шага труб и угрублением помола пыли. Однако указанные мероприятия не всегда дают ожидаемый результат. В связи с этим следует особо



осветить вопросы, связанные с работой поверхностей нагрева в условиях, благоприятных для образования спекшихся сульфатных отложений.

## II ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОНВЕКТИВНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НАГРЕВА С УЧЕТОМ ВОЗМОЖНОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ СУЛЬФАТА КАЛЬЦИЯ

### Критическая толщина слоя летучей золы на поверхностях нагрева

В области, где температура газов благоприятствует синтезу  $\text{CaSO}_4$ , необходимо использовать охлаждающее действие поверхности нагрева для предотвращения или, в худшем случае, ограничения процесса спекания отложений летучей золы. Исходя из этого, представляют большой практический интерес вопросы влияния температуры и тепловой нагрузки поверхности нагрева на процесс спекания отложений летучей золы.

Обозначим температуру металла поверхности нагрева через  $t_{мет}$ , нижний и верхний температурный предел образования  $\text{CaSO}_4$  через  $t'_{\text{CaSO}_4}$  и  $t''_{\text{CaSO}_4}$ . В непосредственной близости поверхности нагрева спекания золовых отложений не происходит, если

$$t_{мет} < t'_{\text{CaSO}_4}.$$

Температура наружного слоя отложения ( $t_{загр}$ ) определяется из уравнения:

$$t_{загр} = t_{мет} + \frac{\delta_{загр}}{\lambda_{загр}} q, \quad (1)$$

где  $\delta_{загр}$  и  $\lambda_{загр}$  — толщина и коэффициент теплопроводности отложения,  $q$  — тепловая нагрузка поверхности нагрева. Образование  $\text{CaSO}_4$  в отложении начинается при

$$t_{загр} \geq t'_{\text{CaSO}_4}.$$

Подставляя в уравнение (1) вместо  $t_{загр}$  температуру  $t'_{\text{CaSO}_4}$ , получаем формулу для определения критической толщины отложения, при превышении которой начинается в отложениях образование  $\text{CaSO}_4$ :

$$\delta_{загр}^{кр} = \frac{\lambda_{загр}}{q} (t'_{\text{CaSO}_4} - t_{мет}). \quad (2)$$

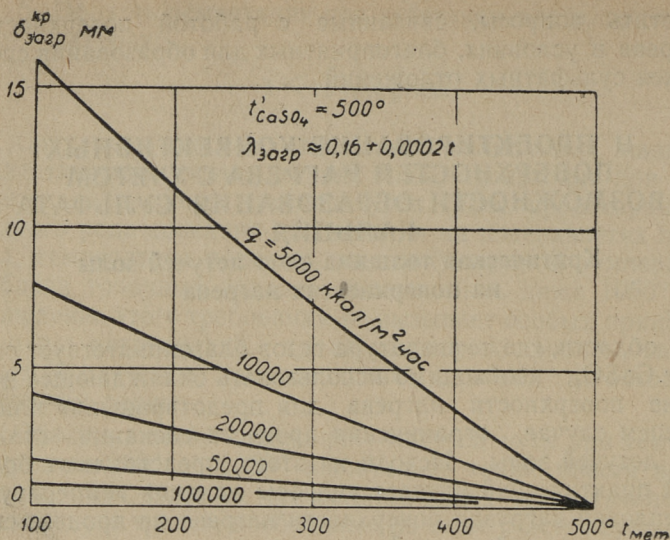


Рис. 7 — Критическая толщина отложения летучей золы на поверхности нагрева в зависимости от тепловой нагрузки и температуры металла поверхности нагрева.

Кривые на рис. 7 дают представление о критической толщине отложения при  $t'_{CaSO_4} = 500^\circ$ . Теплопроводность отложения, необходимая при составлении указанных кривых, вычислена при помощи обобщенной формулы Б. Н. Кауфмана для неорганических сыпучих материалов [6].

Известно, что одновременно с ростом загрязняющего слоя за счет осаждения тонких фракций происходит и его разрушение ударами более крупных частиц золы. Установившееся состояние загрязненного слоя может наступить при толщине отложения меньше критической. В таком случае образование сульфата кальция и процесс спекания не происходят. Если установившееся состояние загрязненного слоя не наступает до достижения критической толщины отложения, то в отложении неизбежно образуется сульфат кальция.

Критическая толщина отложения изменяется обратно пропорционально тепловой нагрузке и пропорционально разности температур  $t'_{CaSO_4} - t_{мет}$ . Этим объясняется отсутствие спекшихся сульфатных отложений на поверхностях



нагрева котлов низкого давления, особо трудные условия работы пароперегревателей, имеющих высокую температуру поверхности нагрева, увеличение затруднений при очистке поверхностей нагрева с увеличением нагрузки котла и т. д.

### Условия ограниченного и неограниченного роста спекающихся сульфатных отложений

Образование спекшихся сульфатных отложений на поверхностях нагрева может протекать при двояких условиях, исходя из температуры газового потока,  $\vartheta$ :

1. При

$$\vartheta \leq t''_{\text{CaSO}_4}$$

спекающееся отложение растет практически неограниченно, так как наружные спекающиеся слои отложения уже не подчиняются закону равновесия сыпучих отложений. Работа поверхности нагрева при условии «неограниченного роста» спекающихся отложений причиняет серьезные эксплуатационные затруднения, так как при этом имеется опасность сплошной закупорки и «цементации» проходов в газоходе.

2. При

$$\vartheta > t''_{\text{CaSO}_4}$$

спекающееся отложение растет только до достижения толщины, при которой температура его наружного слоя не достигает температуры верхнего предела образования сульфата кальция, т. е. при  $t_{\text{загр}} < t''_{\text{CaSO}_4}$ . При дальнейшем росте отложения наружные слои, имеющие температуру выше  $t''_{\text{CaSO}_4}$ , уже не спекаются в процессе образования сульфата кальция. Таким образом при работе поверхности нагрева в условиях «ограниченного роста» спекающихся сульфатных отложений, отпадает опасность сплошной «цементации» газохода. При наличии регулярной обдувки поверхности работают с постоянными твердыми сульфатными налетами. При этом необходимо обратить внимание еще на то обстоятельство, что при чрезмерно высокой температуре газов ( $\vartheta > 1050^\circ$ ) снова может наступить спекание наружных слоев отложений под воздействием жидких и пластических частиц золы.

## Возможности для расчетного определения условий работы поверхности нагрева

Представление о критической толщине отложения позволяет разъяснить условия образования спекшихся сульфатных золовых отложений на поверхностях нагрева. Однако этого еще недостаточно для проектирования поверхностей нагрева и их размещения на газовом тракте котлоагрегата. Толщина слоя загрязнения на окружности трубы не является одинаковой, отсутствуют методы для проектирования формы слоя загрязнения. Эти затруднения можно частично преодолеть, оперируя с величиной интегрального сопротивления теплоперехода через загрязняющий слой летучей золы, т. е. коэффициентом загрязнения трубы  $\varepsilon = \frac{\delta_{загр}}{\lambda_{загр}}$ . В настоящее время имеются уже расчетные формулы для определения коэффициента загрязнения в случае сыпучих отложений летучей золы, отражающие влияние скорости газов диаметра и шагов труб, крупности золы и направления потока газа [7]. При нижекритической толщине отложения летучей золы эстонского горючего сланца являются также обычными сыпучими отложениями. Поэтому упомянутые формулы вполне применимы для данного случая.

При помощи коэффициента загрязнения можно выразить среднюю температуру поверхности загрязнения:

$$t_{загр. ср} = t_{жс} + q \left( \frac{1}{\alpha_2} + \varepsilon \right), \quad (3)$$

где, кроме ранее отмеченных обозначений  $t_{жс}$  — температура нагреваемой среды;  $\alpha_2$  — внутренний коэффициент теплоотдачи. Для предотвращения образования  $\text{CaSO}_4$  должно быть удовлетворено условие:

$$t_{загр. ср} < \tau t'_{\text{CaSO}_4},$$

где  $\tau$  — коэффициент, учитывающий неравномерность температуры наружной поверхности загрязнения по периметру. Вводя это условие в формулу (3), получаем формулу для определения критического значения коэффициента загрязнения:

$$\varepsilon^{кр} = \frac{1}{q} (\tau t'_{\text{CaSO}_4} - t_{жс}) - \frac{1}{\alpha_2} \left[ \frac{\text{м}^2 \text{ час град}}{\text{ккал}} \right]. \quad (4)$$



Образование сульфата кальция в отложениях предотвращено, если коэффициент загрязнения для сыпучего отложения меньше критического значения, т. е. при

$$\varepsilon < \varepsilon^{кр.}$$

Для применения формулы (4) должен быть известен коэффициент неравномерности  $\tau$ , экспериментальные данные которого пока еще отсутствуют. Более толстый слой отложения образуется на кормовой части труб, где ввиду его меньшей плотности даже при условиях образования сульфата кальция не происходит заметного спекания. Таким образом кормовую часть отложения можно рассматривать как сыпучее отложение, что позволяет практически отказаться от требования полного предотвращения синтеза сульфата кальция в отложениях. Учитывая все вышесказанное и результаты контрольных расчетов на действующем котлоагрегате, автор предлагает для расчетов в первом приближении принять:

$$\tau t'_{CaSO_4} \approx 500,$$

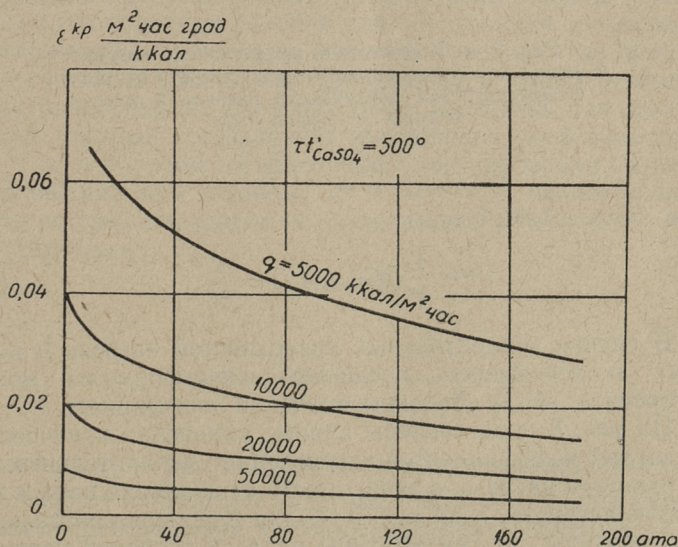


Рис. 8 — Критический коэффициент загрязнения испарительных поверхностей нагрева в зависимости от тепловой нагрузки поверхности нагрева и давления пара.

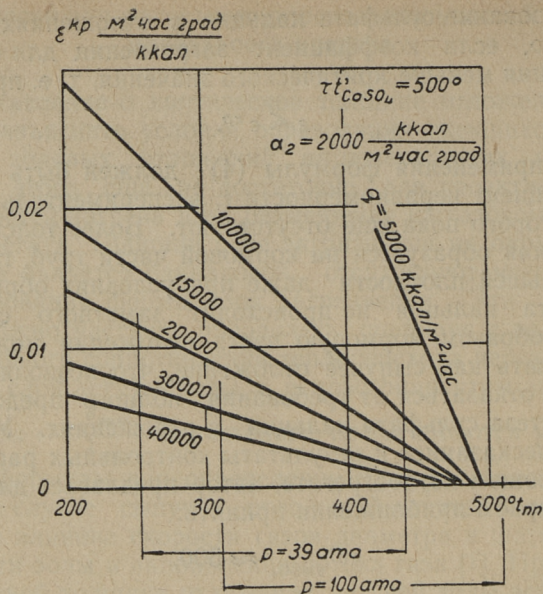


Рис. 9 — Критический коэффициент загрязнения пароперегревателя в зависимости от тепловой нагрузки поверхности нагрева и температуры перегрева пара.

и в соответствии с этим:

$$\varepsilon_{кр} = \frac{1}{q} (500 - t_{жс}) - \frac{1}{\alpha_2}. \quad (4a)$$

В случае испарительных поверхностей нагрева и водяных экономайзеров, последний член формулы можно отбросить, ввиду больших значений коэффициента  $\alpha_2$ .

На рис. 8 представлены кривые изменения критических значений коэффициентов загрязнения испарительных поверхностей нагрева, в зависимости от давления пара и тепловой нагрузки, а на рис. 9 — для пароперегревателя, в зависимости от температуры пара и тепловой нагрузки (при  $\alpha_2 = 2000$  ккал/м² час град). Расчетные значения коэффициентов загрязнения для сыпучих отложений находятся обычно в пределах 0,005—0,02 м² час град/ккал,



имея таким образом величину порядка критических значений при обычных тепловых нагрузках конвективных поверхностей нагрева (10000—20000 ккал/м<sup>2</sup> час).

Неизбежным, однако, является образование спекшихся сульфатных отложений на высокотемпературной части конвективных пароперегревателей, особенно при котлах высокого давления (при  $t_{nn} > 450-475^\circ$ ,  $\varepsilon^{кр} = 0$ ). Из этого следует, что высокотемпературная часть пароперегревателя при высоком давлении должна размещаться либо в топке, либо частично в топке и частично в области, где рост сульфатных отложений является ограниченным (при температуре газов от 850—900° до 1000°). Разумеется, что при этом появляется необходимость в снабжении перегревателей эффективными высоконапорными обдувочными приборами, обеспечивающими напор струи до 300—400 кг/м<sup>2</sup>, так как в области 900—1050° наблюдается резкое ухудшение сдуваемости отложений (рис. 3).

Следует отметить, что на режим спекания заметное влияние оказывают неравномерности скорости газов, концентрации и фракционного состава летучей золы, а также тепловой нагрузки в поперечном сечении газохода. Наиболее благоприятные условия для образования спекающихся отложений создаются на участках газохода, где проходит летучая зола с меньшим содержанием крупных фракций и где одновременно скорость газов занижена, так как при этом местный коэффициент загрязнения увеличивается.

Таким образом на некоторых участках может создаться положение, при котором  $\varepsilon_{местн} > \varepsilon_{местн. кр}$ , несмотря на то, что по средним условиям газохода  $\varepsilon < \varepsilon^{кр}$ .

Выражая:

$$\varepsilon_{местн} = k_\varepsilon \varepsilon$$

и

$$\varepsilon_{местн. кр} \approx \frac{q}{q_{местн}} \varepsilon^{кр} = \frac{1}{k_q} \varepsilon^{кр},$$

где  $k_\varepsilon$  и  $k_q$  — коэффициенты местной неравномерности загрязнения и тепловой нагрузки, можно написать условие для предотвращения местного спекания в газоходе:

$$\varepsilon < \frac{1}{k_\varepsilon k_q} \varepsilon^{кр} = \varphi \varepsilon^{кр}. \quad (5)$$

Из формул для определения коэффициентов загрязнения [7] можно вывести формулу для определения коэффициента неравномерности:

$$k_s = (1 - m \lg k_R) 10^{nw(1-k_w)}, \quad (6)$$

где

$$k_w = \frac{\omega_{местн}}{\omega};$$

$$k_R = \frac{R_{30}^{местн}}{R_{30}};$$

$\omega$  — скорость газов;  $R_{30}$  — остаток летучей золы на сите 30 мкр;  $m$  и  $n$  — коэффициенты, зависящие от формы и размеров поверхности нагрева и крупности золы.

Для эстонского горючего сланца при  $R_{30} = 66\%$  получаем, в случае шахматного пучка:

$$m_w = 1,8 \text{ и } n_w = 0,052 + 0,094 \left( \frac{1}{s_2/d} \right)^4;$$

в случае коридорного пучка:

$$m_k = 3,4 \text{ и } n_k = 0,08.$$

В распространенных в настоящее время котлоагрегатах с П-образной компоновкой участки минимальной скорости газов и минимальной тепловой нагрузки совпадают с участками более мелкой летучей золы.

Требуемые для наших расчетов коэффициенты неравномерности полей скоростей газов и крупности золы в сторону их минимальных значений являются, в первом приближении, обратными величинами коэффициентов неравномерности полей скорости газов и концентрации золы в сторону их максимальных значений, используемых при расчетах золотого износа поверхностей нагрева [3]. Таким образом, можно установить следующие ориентировочные значения для котлоагрегатов с П-образной компоновкой:

а) пароперегреватель:  $k_w \approx k_q = 0,9$ ;  $k_R = 0,9$ ;

б) водяной экономайзер:  $k_w \approx k_q = 0,85$ ;  $k_R = 0,7-0,8$ .



На рис. 10 представлена зависимость коэффициентов

$$\varphi = \frac{1}{k_{\varepsilon} k_q}$$

от скорости газов для случаев коридорного пароперегревателя и шахматного водяного экономайзера П-образного котлоагрегата.

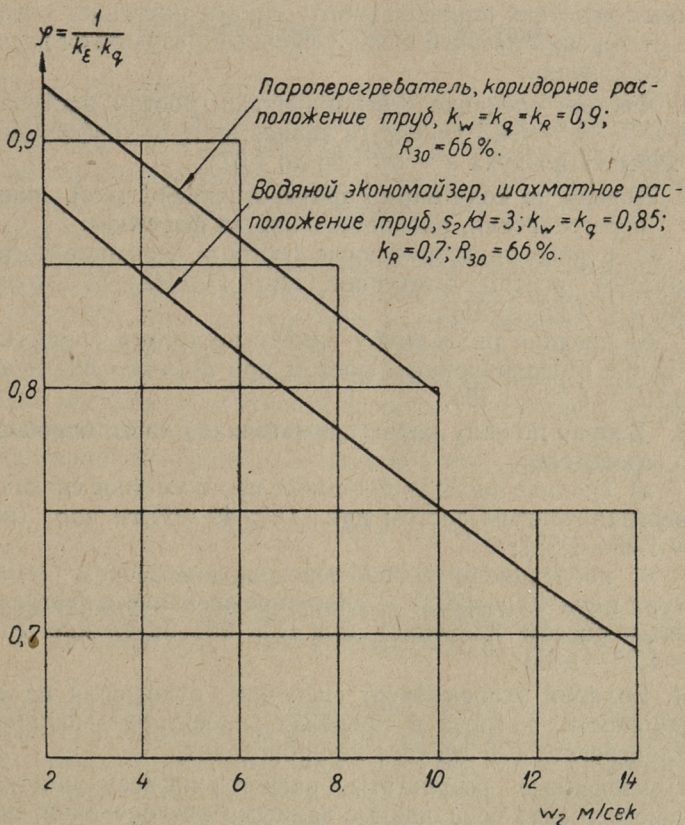


Рис. 10. — Зависимость коэффициента  $\varphi = \frac{1}{k_{\varepsilon} \cdot k_q}$  от скорости газов.

## Результаты проверочных расчетов

Представленная в данной статье схема расчетов проверена на котлоагрегате ЦКТИ-БКЗ 75-39Ф. Котлоагрегаты указанного типа установлены на одной из ТЭЦ «Эстонэнерго», где они работают с давлением пара 32 атм и с температурой перегрева пара 420°. Проектная мощность котлоагрегата 75 тн/час. Расчетами определялись соответствующие нагрузки котла, при которых на определенных участках конвентивного тракта наступает спекание отложений летучей золы. Основные результаты расчетов следующие:

1. **Фестон:** спекание с ограниченным ростом наступает при  $D > 34,5—54,5$  тн/час (в зависимости от коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  = от 1,25 до 1,67).

2. **Первая по ходу пара (противоточная) часть пароперегревателя, расположенная за фестом:**

а) первые ряды труб после фестона—спекание с ограниченным ростом наступает при  $D > 42—71$  тн/час (при  $\alpha = 1,25—1,31$ );

б) средние ряды труб — имеет место только местное спекание с ограниченным ростом при  $D > 50—69$  тн/час (при  $\alpha = 1,25—1,35$ ).

3. **Вторая по ходу пара (прямоточная) часть пароперегревателя:**

а) средние ряды труб—имеет место местное спекание с неограниченным ростом при  $D > 49—60$  тн/час (при  $\alpha = 1,25—1,53$ );

б) последние ряды труб перед экономайзером (температура пара 400—420°) — сплошное спекание с неограниченным ростом наступает при  $D > 49—60$  тн/час (при  $\alpha = 1,25—1,53$ ).

4. **Водяной экономайзер:** спекания отложений на его поверхности нагрева в пределах проектной мощности котлоагрегата (75 тн/час) не происходит.

Приведенные результаты расчетов по всем участкам газового тракта совпадают с данными исследований, проведенных на действующих котлоагрегатах. Мощность котлоагрегата фактически лимитируется неограниченным ростом спекающихся отложений на второй части пароперегревателя до 50—60 тн/час. Такой же результат показывают и данные наших расчетов.



Произведенные расчеты показывают, что условия работы данного котлоагрегата существенно улучшаются при реконструкции пароперегревателя согласно противоточной схеме, ввиду того, что при такой схеме высокотемпературные змеевики пароперегревателя, на которых неизбежно образование спекающихся отложений, расположены в диапазоне ограниченного роста упомянутых отложений.

### Влияние периодической обдувки

Периодическая обдувка поверхности нагрева является положительным мероприятием против процесса спекания отложений. Опытами ВТИ доказано, что установившееся значение коэффициента  $\varepsilon$  достигается через 10—15 часов работы, а 50—70% загрязняющего слоя оседает в первые 2—2,5 часа работы [7].

Следовательно при применении механизированной обдувки четыре раза за смену коэффициент  $\varepsilon$  уменьшается на 50—30%. Нередко при этом удается заметно повысить нагрузку котлоагрегата, при которой на определенных участках наступает спекание отложений летучей золы.

При расчетах поверхности нагрева с применением механизированной обдувки раз в 2—2,5 часа условия для предотвращения общего и местного спекания принимают вид:

$$0,7 \varepsilon < \varepsilon^{KP} \text{ и } 0,7 \varepsilon < \varphi \varepsilon^{KP}.$$

### III НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ РАСЧЕТА ТОПКИ, СВЯЗАННЫЕ С ЗАГРЯЗНЕНИЕМ ЭКРАНОВ

Температура газов на выходе из топки спроектирована для котлоагрегатов на эстонском горючем сланце в основном ниже температуры, определяющей начало вредного действия пластических фаз золы ( $1050^\circ$ ). Однако, после 3—4-недельной работы экранные поверхности нагрева оказываются уже до такой степени загрязненными, что проектная температура газов на выходе из топки достигается при нагрузке котла 25—30% ниже проектной. Систематических наблюдений и исследований характера загрязнения экранных поверхностей топки не производи-

лось. Поэтому, до проведения соответствующих исследований, которые позволили бы ввести поправки в расчеты теплопередачи топки на эстонском горючем сланце, следует рекомендовать следующее:

1. Пылевая топка на эстонском горючем сланце должна быть спроектирована либо с поворотными горелками, либо с многоярусным расположением дублированных горелок.

2. Нижнее положение поворотных горелок или же ряда с горелками нижних рядов, должны обеспечить при номинальной нагрузке котла расчетную температуру газов на выходе из топки:

$$\vartheta_T'' = 900-950^\circ.$$

В противном случае, при загрязненных экранах, температура газов на выходе из топки может превысить опасный предел —  $1050^\circ$ .

3. Верхнее положение поворотных горелок или же работа с горелками верхних рядов необходимо при работе с чистыми экранами, а также при сниженной нагрузке котла.

#### IV ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Установление закономерностей и условий спекания летучей золы эстонского горючего сланца открывает возможности и пути проектирования котельных агрегатов на этом виде топлива, с учетом вредных процессов спекания отложений на поверхности нагрева. Даны рекомендации и схемы расчета, применение которых позволяет приступить в первом приближении к целеустремленной рационализации котлоагрегатов на сланце.

2. Для уточнения рекомендаций и расчетных схем требуется дальнейшее развитие исследований. При этом необходимо в первую очередь обратить внимание на уточнение влияния температуры, скорости газов и коэффициента загрязнения на сдуваемость отложений в диапазоне образования спекшихся сульфатных отложений, а также на исследование характера загрязнения топочных экранов и влияния этого процесса на теплопередачу топки.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Торпан Б. К. О химическом и минералогическом составе пластов и пропластов кукерсита. Труды ТПИ, серия А, № 57, 1954 г.
  2. Будников П. П. Гипс, его исследование и применение, 1948 г.
  3. Невельсон С. П. Паровые котлы на местном топливе, 1950 г.
  4. Шнейдерман Б. А. «Электрические станции» № 10, 1949 г.
  5. Баранов А. П. «Котлотурбостроение» № 1, 1953 г.
  6. Кауфман Б. Н. «Строительная промышленность» № 8, 1951 г.
  7. Кузнецов Н. В. и Щербаков А. З. Загрязнение золой поверхности нагрева, «Теплоэнергетика» № 1, 1954 г.
-

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение . . . . .	3
<b>I Процессы спекания летучей золы эстонского горючего сланца</b>	3
Действие сепаратных легкоплавких частиц золы . . . . .	5
Действие свободной извести золы . . . . .	7
Температурные диапазоны характерных процессов спекания летучей золы . . . . .	12
<b>II Проектирование конвективных поверхностей нагрева с учетом возможности образования сульфата кальция</b>	15
Критическая толщина слоя летучей золы на поверхностях нагрева . . . . .	15
Условия ограниченного и неограниченного роста спекающихся сульфатных отложений . . . . .	17
Возможности для расчетного определения условий работы поверхности нагрева . . . . .	18
Результаты проверочных расчетов . . . . .	24
Влияние периодической обдувки . . . . .	25
<b>III Некоторые вопросы расчета топки, связанные с загрязнением экранов</b> . . . . .	25
<b>IV Заключение</b> . . . . .	26
Литература . . . . .	27

И. П. Эпик

О ПРОЕКТИРОВАНИИ КОТЕЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ С УЧЕТОМ ПРОЦЕССОВ СПЕКАНИЯ ЛЕТУЧЕЙ ЗОЛЫ СЛАНЦА-КУКЕРСИТА

Эстонское Государственное Издательство  
Таллин, Пярну маантеэ 10.

\*

Редактор С. Р. Буачидзе  
Технический редактор М. Аардма  
Корректор Н. Круглова

---

Сдано в набор 29 III 1955. Подписано к печати 7 V 1955. Бумага 54/84, 1/16. Печатных листов 1,75. По формату 60×92 печатных листов 1,44. Учетно-издательских листов 1,17. Тираж 800. МВ-09041. Заказ № 1800.

---

Типография «Коммунист», Таллин, улица Пикк 2.

Цена 85 коп.