

И. МИКК

# ОБ ОБРАЗОВАНИИ ОТЛОЖЕНИЙ И ОКАМЕНЕЛОСТЕЙ ЛЕТУЧЕЙ ЗОЛЫ НА ТРУБАХ

ИЗДАТЕЛЬСТВО  
ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА  
ТАЛЛИН, 1957



Er. 6.7

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED  
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

Серия А

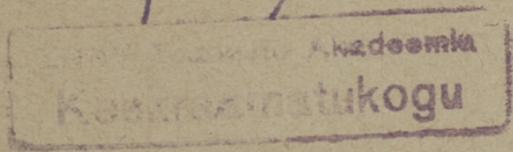
№ 102

1957

И. МИКК

# ОБ ОБРАЗОВАНИИ ОТЛОЖЕНИЙ И ОКАМЕНЕЛОСТЕЙ ЛЕТУЧЕЙ ЗОЛЫ НА ТРУБАХ

Er. 357



ИЗДАТЕЛЬСТВО  
ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА  
ТАЛЛИН, 1957

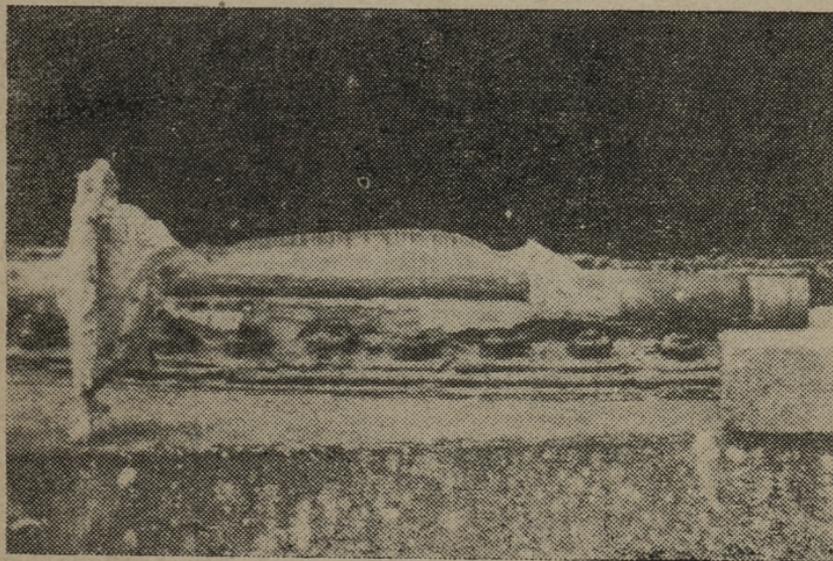


## 1. ОБЩИЕ СООБРАЖЕНИЯ И НАМЕЧЕННАЯ ЦЕЛЬ

Важным вопросом в эксплуатации современных котельных установок является внешнее загрязнение поверхности нагрева, которое, ухудшая условия теплопередачи, снижает показатели котла. При сжигании некоторых топлив, в том числе и эстонских горючих сланцев, на конвективных поверхностях нагрева при температуре ниже характеристик плавкости золы встречаются параллельно два типа загрязнений:

1. Монолитные, очень прочные окаменелости, которые невозможно полностью удалить обдуванием. Поскольку они образуются уже при температурах порядка  $500^{\circ}\text{C}$  и выше, их возникновение невозможно отнести на счет липкости или плавкости зольных частиц.

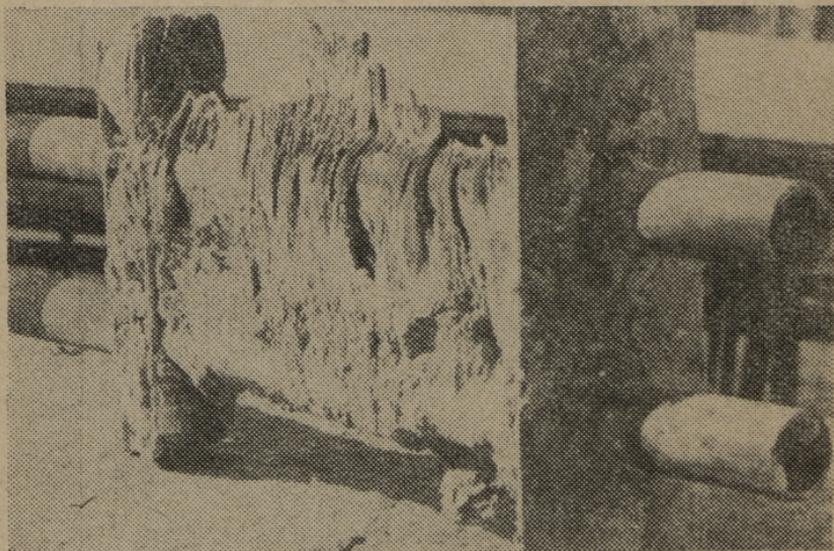
2. Рыхлые, непрочные отложения, которые практически сдуваемы и поэтому в меньшей степени влияют на работу котельного агрегата.



Фиг. 1. Окаменелость на лобовой стороне трубы.  
Опыт 140

На фиг. 1 показаны загрязнения, полученные на опытной трубе в поперечном потоке газов. На тыльной стороне трубы образовались рыхлые отложения летучей золы, которые большей частью рассыпались до фотографирования. На лобовой стороне трубы видны окаменелости своеобразной формы. Так как температурные и химические условия на лобовой и тыльной стороне трубы были одинаковы, то различие в характере загрязнений можно объяснить только механическими условиями.

Развитие окаменелости на трубе начинается с возникновения тонкого сероватого слоя на лобовой стороне трубы. Далее этот так называемый подслой утолщается и на нем нарастают против направления потока острые игло- или гребнеобразные окаменелости. Подслой и находящиеся на нем окаменелости резко отличаются от отложений на тыльной стороне по прочности и по структуре, а также по своему химическому составу.



Фиг. 2. Загрязнение парных поперечноомываемых труб в условиях образования окаменелостей.  
Опыт 151

На фиг. 2 показано загрязнение двух последовательно расположенных опытных труб в поперечном потоке газов. На лобовой стороне передней трубы (верхняя труба) ока-

менелости развиваются аналогично одиночной трубе. Задняя труба начинает покрываться окаменелостями летучей золы по бокам лобовой образующей. Свободная летучая зола осаждается между гребнями окаменелостей задней трубы и на тыльной стороне передней трубы. Таким образом пространство между трубами в течение некоторого времени полностью заливается летучей золой. Межтрубное заполнение, имея скелет из гребней окаменелости, обладает большой механической прочностью и обычно не удаляется сдуванием.

Сдуваемость таких комбинированных отложений определяется и тем, начинается ли рост окаменелостей с поверхности рыхлого отложения или прямо с поверхности трубы. Самым неблагоприятным является последний случай, так как окаменелости очень крепко связываются с металлической поверхностью трубы.

В Таллинском политехническом институте проводятся под руководством И. Эпика исследования по выяснению характера образования окаменелостей летучей золы и учета этого явления при проектировании котельных агрегатов, в комплекс которых входит данная работа.

В предыдущих этапах этих исследований было установлено, что образование окаменелости происходит за счет химической реакции сульфатизации кальция (1). В результате этого окаменелости имеют очень большое содержание  $\text{CaO}$  и  $\text{SO}_3$ , сумма которых часто превышает 80%. Эстонские сланцы содержат очень много кальция в виде карбоната и значительное количество органической и пиритной серы. Поэтому они и вызывают образование сульфатных окаменелостей. Образование окаменелости летучей золы имеет место и при использовании различных других топлив, содержащих достаточное количество необходимых исходных веществ. Например заграничные исследователи сталкивались также с сульфатными окаменелостями при применении некоторых марок бурых и каменных углей (4, 5, 6). Образование окаменелости наблюдалось и на базе других химических реакций (7, 8).

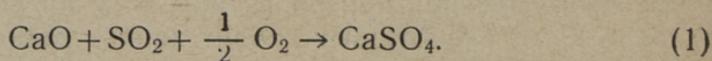
Имеющиеся литературные данные об окаменелостях летучей золы ограничиваются главным образом химической стороной их образования. В них отсутствуют теоретические основы, которые позволили бы объяснить действие механических факторов на процесс образования окаменелости.

В связи с этим наши экспериментальные исследования в 1955/1956 году были направлены к заполнению этого пробела и к получению необходимых опытных данных, которые позволили хотя бы приближенно оценить влияние различных механических и химических факторов на образование окаменелостей.

В данной статье приведен обзор этих опытов и важнейших результатов. Одновременно приведены и теоретические положения, разъясняющие механизм образования окаменелостей и позволяющие глубже понимать полученные результаты экспериментов.

При этом будем ограничиваться преимущественно механической стороной процесса окаменения.

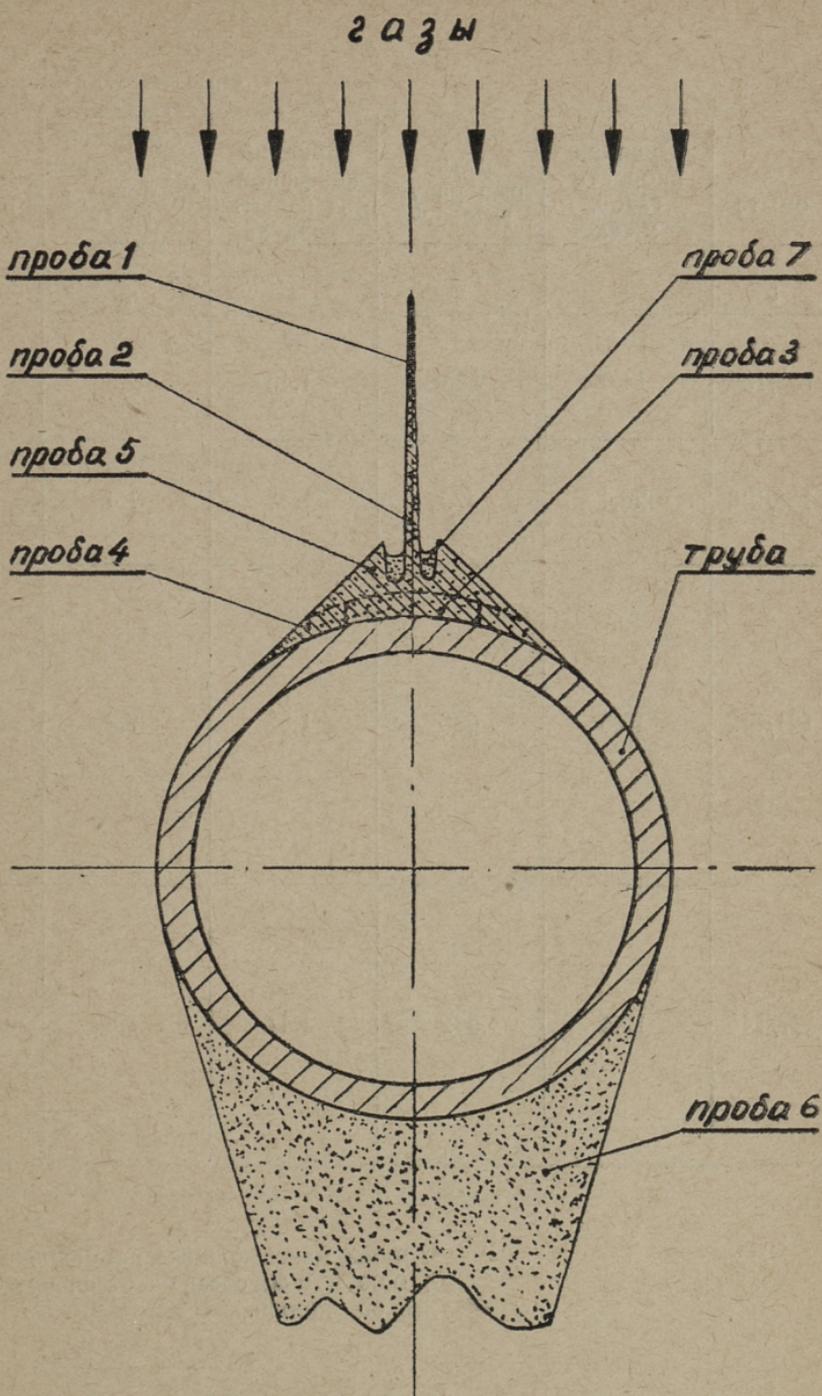
В отношении химической природы процессов окаменения предполагают, что возникновение окаменелости может происходить на базе различных реакций и поэтому этот вопрос нуждается в дальнейшем уточнении. Например, возможно образование сульфата кальция за счет сульфатизации свободной извести согласно суммарной реакции:



Возможно также окисление сульфида кальция по уравнению



В табл. 1 и 2 приведены химические анализы некоторых характерных проб окаменелостей и летучей золы, отобранных во время опытов. На фиг. 3 показан порядок отбора этих проб и даны номера проб. Из сравнения анализов вытекает предположение о возможности обеих типов реакции.



Фиг. 3. Схема отбора проб окаменелостей.

Опытные данные и ана

№ опыта	Средняя скорость газов, м/сек	Средняя температура газов, °С	Средний коэффициент избытка воздуха	Скорость образования окаменелости <sup>1)</sup> мм/час	№ пробы
1	2	3	4	5	6
133/134	14,0	588	1,45	2,3	1,2 3,4 —
139/140	20,4	679	1,43	1,4	1,2 3,4 —
141/142	15,5	636	1,53	2,8	1 2 3,4 5 7 — — — — —
147/148	12,4	642	1,41	1,8	1 2 3 4 5 6 — — —

<sup>1)</sup> Даны максимальные установленные скорости  
<sup>2)</sup> D 60 и R 60 обозначают фракции летучей  
 лее 60 микрон.

Таблица 1

лизы окаменелостей

Характеристика пробы	SO <sub>2</sub> общая, %	SO <sub>2</sub> суль- фатн., %	CaO общая, %	CaO свобод- ная, %
7	8	9	10	11
гребень	32,2	31,3	—	—
подслой	36,7	36,1	—	—
летучая зола	4,8	4,6	—	—
гребень	41,5	40,8	57,7	0,2
подслой	36,3	35,4	55,9	0,4
летучая зола	4,0	3,3	40,2	9,6
гребень	40,3	37,9	41,3	—
гребень	37,8	36,4	37,3	0,2
подслой	39,2	39,2	42,1	0,5
подслой	29,7	28,6	38,6	—
сыпучая зола	15,3	13,6	34,5	—
лет. зола I	4,7	4,6	37,2	10,2
лет. зола I D 60 <sup>2</sup>	4,7	4,5	34,2	8,1
лет. зола I R 60	—	—	52,6	20,8
лет. зола II	5,5	5,0	37,5	11,7
лет. зола II D 60	5,5	5,1	35,1	8,9
лет. зола II R 60	4,9	4,6	58,8	—
гребень	39,4	38,5	—	—
гребень	43,1	39,7	—	—
подслой	41,1	40,4	—	—
подслой	39,6	38,8	—	—
подслой	32,5	32,2	—	—
отлож. тыльн. стороны	20,5	19,8	—	—
лет. зола	4,8	4,6	—	—
лет. зола D 60	5,1	5,0	—	—
лет. зола R 60	4,2	3,9	—	—

сти образования гребня окаменелостей.  
зола размером соответственно менее и бо-

Химические анализы к опыту 32  
(скорость газов 16,4 м/сек, температура газов 614°C)

	Характеристика проб	Потери прокали- вания, %	SiO <sub>2</sub> %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	CaO, %	MgO %	K <sub>2</sub> O+ Na <sub>2</sub> O, %	SO <sub>3</sub> сульфатная, %
1	Гребень окаменелости . . . . .	1,9	13,7	3,2	4,8	35,1	2,0	4,0	35,4
2	Внешняя часть подслоя . . . . .	3,0	13,1	3,4	3,5	37,0	2,3	3,5	33,9
3	Внутренняя часть подслоя (приле- гающая к трубе) . . . . .	2,3	7,8	2,9	2,5	39,6	2,4	1,5	41,4
4	Рыхлое отложение на тыльной сто- роне . . . . .	2,7	31,3	5,4	7,7	29,5	3,7	4,1	15,8
5	Летучая зола . . . . .	2,7	29,7	6,0	8,5	41,4	2,5	3,4	6,4
6	Зола из под мультициклона . . . . .	1,7	30,1	5,9	8,9	41,9	3,7	3,4	4,5
7	Шлак из под холодной воронки . . . . .	4,3	21,0	6,6	4,2	52,7	4,8	1,9	4,5
8	Топливо . . . . .	54,9	14,3	3,0	3,7	17,5	3,1	2,1	0,2

## II. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

При начале этих исследований у нас отсутствовали данные и теоретические основы, которые позволили бы построить специальную установку для исследования процессов образования окаменелостей. Поэтому было решено построить канал, шунтирующий газоходы котла, как подающий надежды на получение и исследование окаменелости полу-лабораторным путем.

Канал был построен на барабанный котел средних параметров (32 ати, 410°C), номинальной производительности 65 т/час с шахтными мельницами. Канал соединял газоход пароперегревателя с газоходом перед дымососом и был выполнен в виде трубы диаметром 380 мм из 2,5 мм листовой стали. Канал был изнутри торкретирован слоем толщиной в 40 мм и снаружи изолирован совелитовыми плитками толщиной в 60 мм. В канале были предусмотрены места для исследуемых элементов поверхностей нагрева.

При опытах использовались одиночные поперечно оmyаемые трубы наружным диаметром 32, 38 и 57 мм (фиг. 1). Для труб было предусмотрено воздушное охлаждение. Кроме того использовались неохлаждаемые поперечнооmyаемые парные трубы наружным диаметром 38 мм, с относительными шагами

$$\frac{s}{d} = 1,5; 2,0 \text{ и } 2,5 \text{ (фиг. 2).}$$

Некоторые опыты проводились и с продольнооmyваемой неохлаждаемой трубой наружным диаметром 38 мм.

Согласно целям исследования были проведены следующие серии опытов:

1. Были поставлены опыты с охлаждаемыми одиночными трубами для определения температуры стенки, соответствующей возникновению подслоя. Регулированием охлаждения стремились к тому, чтобы часть лобовой стороны трубы имела достаточную температуру для образования подслоя, другая же часть оставалась без подслоя ввиду слишком низкой температуры стенки.

Таким образом оказалось возможным определить по месту начала подслоя минимальную температуру стенки (далее именуемая температурой возникновения подслоя), при которой начинается образование подслоя и окамене-

лости на поверхности трубы. Опыты этой серии проводились продолжительностью 3—6 час. каждый.

2. Проводились также опыты с одиночными трубами для исследования образования и роста окаменелости. Продолжительность каждого опыта составляла приблизительно 24 часа. Поскольку температура тонких гребнеобразных окаменелостей практически равна температуре газов, то трубы не охлаждались и температура их стенок не измерялась. Во время опыта трубы 3—4 раза вынимали из канала и измеряли высоту гребнеобразных окаменелостей с целью определения скорости их роста. По окончании опыта проводили более точные измерения окаменелости и отбор проб для лабораторных исследований.

Характерные показатели этих опытов и химические анализы взятых проб даны в табл. 1.

Некоторые из полученных окаменелостей фотографировались (фиг. 1).

3. Серия опытов с парными трубами проводилась продолжительностью каждого опыта 25—100 часов с целью визуального наблюдения за характером загрязнений при расположенных друг за другом поперечноомываемых трубах. После опыта трубы с загрязнениями фотографировались (фиг. 2).

4. Визуально наблюдались и исследовались также загрязнения продольноомываемой трубы, которая была установлена в опытном канале на три периода, продолжительность которых была по 200—500 час.

При опытах измерялись скорость и температура газов. Одновременно имелась возможность изменения скорости при помощи заслонки, но непосредственная возможность регулирования температуры газов отсутствовала. Косвенной возможностью воздействия на температуру газов служило изменение нагрузки котла.

При определении температуры возникновения подслоя измерялась и температура стенки трубы, для какой цели были вдолблены в стенках труб 3—5 хромель-алумелевых термопар диаметром 0,4 мм. Свободные концы термопар были выведены через внутренность трубы. Анализы газов для определения коэффициента избытка воздуха во время опытов проводились при помощи анализатора типа «Орса». Взятие проб летучей золы проводилось трубой Альнера.

Примененная методика, разумеется, не давала результатов лабораторной точности и поэтому их следует рассматривать в качестве первого приближения.

### III. ОСАЖДЕНИЕ ЛЕТУЧЕЙ ЗОЛЫ НА ТРУБУ И ОБРАЗОВАНИЕ ОКАМЕНЕЛОСТЕЙ

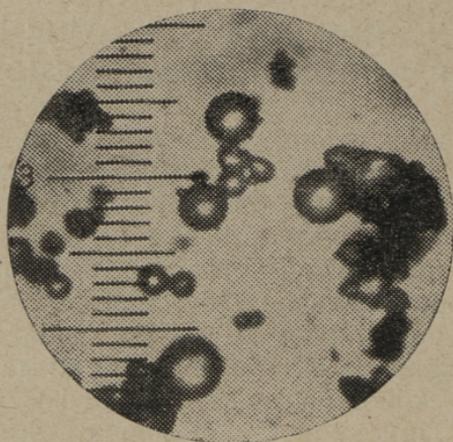
Опыты показали, что на тыльной стороне поперечноомываемой трубы получают рыхлые отложения летучей золы. На лобовой же стороне могут появляться как прочные окаменелости, так и рыхлые отложения. Последние наблюдаются на лобовой стороне преимущественно при умеренных скоростях газов. При наших опытах они наблюдались при скоростях до 10 м/сек. Однако образование подслоя и окаменелости происходило при малых скоростях редко, а при скоростях ниже 5,3 м/сек. они вообще не наблюдались. При скоростях порядка 10 м/сек. и выше рыхлые отложения на лобовой стороне больше не образовывались, но при достаточно высокой температуре стенки трубы (порядка 500°C и выше) всегда имело место интенсивное образование подслоя и окаменелости.

Образование рыхлых отложений основывается на инерционном осаждении летучей золы с сопровождением сцепления отдельных частиц. Действие золовых фракций различных размеров при этом различное.

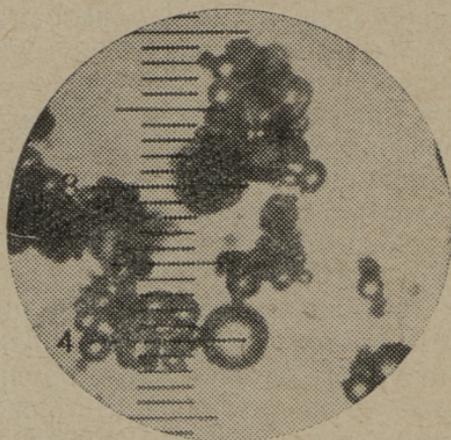
Крупные частицы золы при осаждении имеют большую кинетическую энергию и поэтому, достигая поверхности отложения, они оказывают разрушительное и изнашивающее действие. Крупные частицы противодействуют образованию рыхлых отложений, которые на лобовой стороне трубы возможны поэтому только при низких скоростях. Тыльная сторона трубы не достижима крупным фракциям и вследствие этого здесь, независимо от скорости потока, имеются благоприятные условия к образованию рыхлых отложений.

Мелкие частицы имеют склонность к сцеплению и вместе с тем их кинетическая энергия значительно меньше ввиду их меньшей массы и значительного торможения перед попаданием на поверхность. За счет мелких частиц и происходит образование рыхлого отложения. На фиг. 4 приведен микрофотоснимок отложения, взятого с тыльной стороны, и на фиг. 5 микрофотоснимок рыхлого отложе-

ния с лобовой стороны, которые характеризуют размеры осевших золотых частиц. Как видно, в состав отложений входят преимущественно мелкие частицы (порядка 5—30 мкн).



Фиг. 4. Рыхлое отложение с тыльной стороны трубы. Опыт 32, 1 дел.=5 мкн, фотографировано просвечиванием.



Фиг. 5. Рыхлое отложение с лобовой стороны трубы. Опыт 106, 1 дел.=5 мкн, фотографировано просвечиванием.

Особенно мелкие частицы не принимают участия в процессе инерционного осаждения, а тормозятся не достигая поверхности и проносятся с потоком мимо. Минимальный размер осаждающихся частиц, определяемый при помощи

критического значения критерия Стокса (2), получаем порядка 5 мкн.

Верхний предел размеров фракций, которые еще имеют склонность больше осаждаться чем изнашиваться, оценить теоретически невозможно. Н. Залогин указывает в качестве такого предела 30 мкн (3). В действительности можно предположить, что этот предельный размер зависит от ряда условий (например от скорости частиц при их попадании на поверхность отложения, от силы сцепления мелких частиц в отложении и т. д.) и поэтому не является постоянным. Из фиг. 5 однако видно, что более крупные частицы, входящие в состав рыхлого отложения лобовой стороны трубы, имеют размеры вышеуказанного порядка.

Химические реакции сульфатизации происходят также в рыхлых отложениях. Например из данных, приведенных в табл. 1 и 2 видно, что в образованных отложениях на тыльной стороне содержание  $SO_3$  значительно превышает содержание  $SO_3$  в летучей золе. Но так как в образовании рыхлых отложений принимает участие большое количество химически неактивных частиц, то вероятность прямого контакта между химически активными частицами очень незначительна. Поэтому реакции сульфатизации не обуславливают существенного увеличения механической прочности рыхлых отложений.

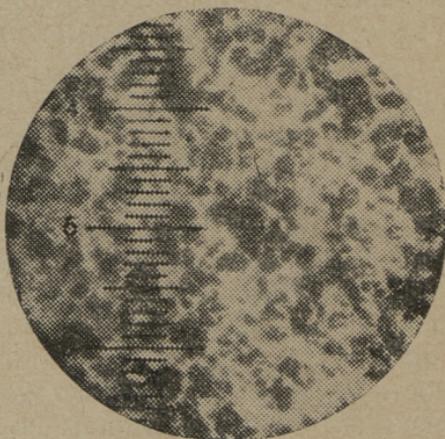
Из вышесказанного вытекает, что образование окаменелости возможно тогда, когда действие крупных фракций не допускает развития рыхлых отложений. В этом случае химически неактивные частицы летучей золы могут задержаться на поверхности трубы или окаменелости только на короткий срок, где их удаляет бомбардирующее действие крупных фракций. Химически активные частицы же связываются сильнее с поверхностью и составляют основную массу окаменелости. Из химических анализов, приведенных в табл. 1 и 2 видно, что окаменелости содержат в сравнении с рыхлыми отложениями больше  $CaO$  и  $SO_3$  и меньше силикатов. Наличие силикатов в составе окаменелости объясняется, во-первых, неоднородностью состава самих химических активных частиц, которые, разумеется, не состоят из чистого  $CaO$  или  $CaS$ , и во-вторых, имеется всегда вероятность попадания и малого количества химически неактивных частиц в состав окаменелости.

Точный характер захватывания частиц летучей золы в настоящее время мало изучен. Первоначальное сцепление

с поверхностью возможно за счет молекулярных и поверхностных сил. Последующее более крепкое схватывание происходит вероятно за счет химической реакции газов, которая служит поводом к перекристаллизации вещества и срастания кристаллов между собой. В качестве примера приведем микрофотоснимки проб окаменелости одного опыта, отобранных по схеме на фиг. 3. На фотоснимке внешней поверхности окаменелости (фиг. 6) различимы отдельные сцепленные на поверхности частицы. На фотоснимке шлифованного разреза окаменелости (фиг. 7)



Фиг. 6. Поверхность окаменелости.  
Опыт 141, проба 2, 1 дел.=42,5 мкм, падение света под углом 45°.



Фиг. 7. Разрез окаменелости.  
Опыт 141, проба 2, 1 дел.=12 мкм, освещение сверху.

видно, как отдельные темные частицы укладываются в связывающей массе более светлого тона. Образование последней объясняется химическими реакциями и перекристаллизацией части вещества.

Из вышесказанного следует, что при образовании окаменелости кроме чисто химических условий (наличие в летучей золе и дымовых газах реагирующих веществ) определяющими являются еще:

1. Промежуток времени между двумя попаданиями крупных частиц на наблюдаемое место;

2. Промежуток времени, требуемый для совершения химической реакции и схватывания мелких, химически активных частиц с поверхностью.

Первый из них зависит от таких механических условий как фракционный состав и концентрация летучей золы, а также характер и скорость потока. При этом повышение скорости, увеличивая действие крупных фракций, замедляет, но с другой стороны, увеличивая общее количество осаждающихся частиц, способствует образованию окаменелости. Второй промежуток времени, требуемый для совершения реакций, обратнопропорционален скорости реакции и зависит от таких кинетических факторов как концентрация реагирующих газообразных веществ и температурный уровень.

#### IV. КРИТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ПОДСЛОЯ

Для возникновения подслоя температура стенки трубы должна быть достаточно высокой, чтобы обеспечить требуемую скорость реакций. Поэтому она является важной характеристикой для образования подслоя. Результаты наших опытов по определению температуры возникновения подслоя были использованы для составления эмпирического уравнения, которое выражает эту температуру в зависимости от механических факторов и состава дымовых газов. При этом мы исходили из предположения, что скорость реакций зависит от парциальных давлений сернистого газа и кислорода в дымовых газах и ее можно пред-

$$v = C_1 e^{-\frac{E}{RT}} P_{\text{SO}_2}^{n_1} P_{\text{O}_2}^{n_2} \approx C_2 e^{-\frac{E}{RT}} \left(\frac{1}{\alpha}\right)^{n_1} \left(\frac{\alpha-1}{\alpha}\right)^{n_2}, \quad (3)$$

ставить приближенным выражением (3) где:  $C_1$  и  $C_2$  константы,  $E$  энергия активации,  $R$  газовая постоянная,  $T$  абсолютная температура и  $\alpha$  коэффициент избытка воздуха. Поэтому оказалось целесообразным представить эмпирическое уравнение в форме:

$$\frac{A}{T} = B + C \lg \frac{1}{\alpha} + D \lg \frac{\alpha - 1}{\alpha}, \quad (4)$$

где  $A$ ,  $C$  и  $D$  константы, а  $B$  функция механических факторов. После обработки опытных данных мы получили уравнение в конечном виде:

$$\begin{aligned} \frac{10000}{T} = & 15,802 + 0,0902w - 0,1571gw - 0,02439d - \\ & - 3,864 \frac{T_r}{1000} + \frac{0,258}{\lg \sigma} - 0,0024\delta_g + 2,3931 \lg \frac{\alpha - 1}{\alpha} - \\ & - 1,3001 \lg \frac{1}{\alpha}, \end{aligned} \quad (5)$$

где:

- $T$  — температура возникновения подслоя, в °К;
- $T_r$  — температура газов, в °К;
- $w$  — скорость газов, в м/сек.;
- $d$  — наружный диаметр трубы, в мм;
- $\alpha$  — коэффициент избытка воздуха.

Величины  $\lg \sigma$  и  $\delta_g$  характеризуют фракционный состав летучей золы и являются параметрами логарифмически нормального закона весового распределения фракций:

$$R(\delta) = \int_{\infty}^{\lg \delta} \frac{100}{\sqrt{2\pi} \lg \sigma} \exp \left[ -\frac{(\lg \delta - \lg \delta_g)^2}{2 \lg^2 \sigma} \right] d \lg \delta \quad (6)$$

Из них  $\delta_g$  характеризует средний размер частиц летучей золы и  $\lg \sigma$  ее полидисперсность. Чтобы получить представление о связи этих параметров с анализом отсева, отметим, что например при значениях  $\delta_g = 40$  мкн и  $\lg \sigma = 0,30$  остаток на сите размером 88 микр. соответствует величине  $R_{88} = 12,7\%$ . С увеличением  $\delta_g$  на 5 мкн  $R_{88}$  увеличивается примерно на 4%, увеличение  $\lg \sigma$  на 0,05 приводит также к увеличению  $R_{88}$  приблизительно на 4%.

Для составления формулы (5) мы располагали данными 24-х опытов, из которых данные 10-ти опытов были без анализа отсева летучей золы. При составлении уравнения, во-первых, определяли константы по данным всех

Опыты для определения температуры возникновения подслоя

№ опыта	Скорость газов, м/сек	Наружн. диаметр трубы, мм	Коэффициент избытка воздуха	Температура газов, °С	$lg \sigma$	$\delta g$ мкн	Температура возникновения подслоя, °С		Отклонение $\Delta t$ °С
							изменяющаяся	расчитанная	
89	5,3	38	1,53	657	0,378	39	600	606	-6
92	8,7	32	1,58	623	0,320	55	540	554	-14
93	8,7	57	1,58	623	0,320	55	609	598	+11
97	10,3	57	1,52	612	0,367	33	598	596	+2
106	7,9	32	1,47	683	0,249	32	572	568	+4
107	7,9	57	1,47	683	0,249	32	610	613	-3
111	14,1	32	1,37	643	0,258	41	524	541	-17
112	14,1	57	1,37	643	0,258	41	590	583	+7
120	11,7	57	1,55	626	0,378	22	589	587	+2
124	9,3	57	1,67	565	0,281	39	550	559	-9
129	13,6	32	1,41	600	0,281	39	550	531	+19
130	13,6	57	1,41	600	0,281	39	584	573	+11
137	19,6	32	1,52	637	0,276	28	475	497	-22
138	19,6	57	1,52	637	0,276	28	538	535	+3

24 опытов за исключением членов, учитывающих фракционный состав летучей золы, а затем уточняли уравнение добавлением этих двух членов на основании полных данных 14 опытов. Соответствие формулы (5) с опытными данными характеризует табл. 3, в которой приведены данные 14 опытов (с полными данными) и температуры возникновения подслоя, рассчитанные по формуле (5), а также разница между измеренной и рассчитанной температурами. Последняя, как видно, колеблется в пределах  $\pm 20^\circ$ .

Ввиду эмпирического характера формулы (5) она применима к диапазону изменения величин, приведенных в табл. 3, т. е.:

$$w = 5 - 20 \text{ м/сек, } d = 32 - 57 \text{ мм, } t_2 = 560 - 680^\circ\text{C,}$$

$$\alpha = 1,35 - 1,7, \lg \sigma = 0,25 - 0,38 \text{ и } \delta_g = 20 - 55 \text{ мкн.}$$

Из формулы (5) вытекает, что при более высоких скоростях и тонких трубах начинается образование окаменелости при более низких значениях температуры стенки. Это объясняется улучшением условий осаждения, в результате которого увеличивается количество мелких фракций, которые более активны в отношении процессов окаменения. Повышение температуры газов приводит к увеличению вязкости газов и, ввиду ухудшения условий осаждения, тормозит образование окаменелости.

Действие коэффициента избытка воздуха связано с природой химических реакций. Согласно формуле (5) его увеличение способствовало процессам окаменения.

С теоретическими соображениями, по которым летучая зола более мелкого состава практически улучшает условия окаменения, формула (5) находится в полном согласии. При этом, разумеется, необходимо существование еще достаточного количества крупных фракций, способствующих селективному удалению неактивных частиц с поверхности.

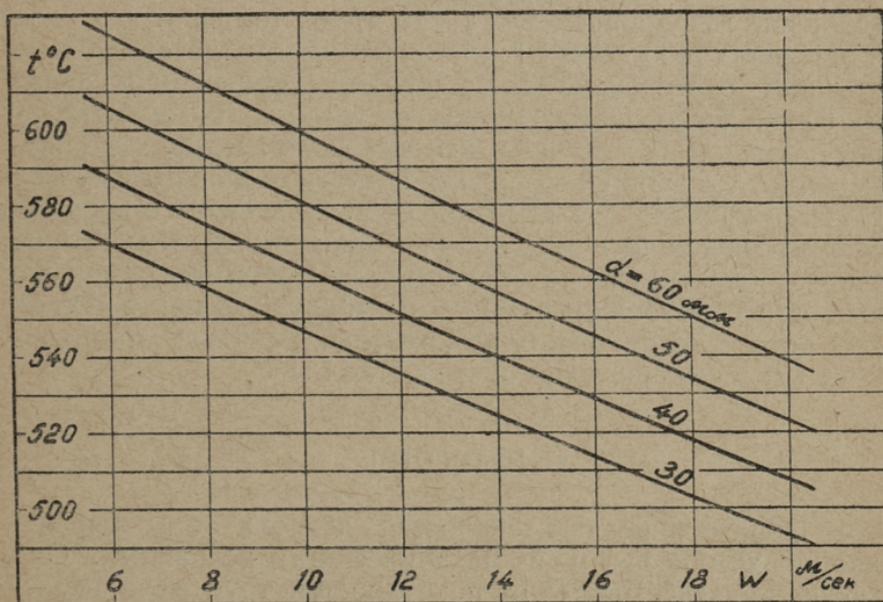
При проектировании котельных агрегатов необходимо определять критическую температуру стенки трубы, при которой начинается образование окаменелостей прямо с поверхности трубы. Для такого расчета целесообразно упростить формулу (5) в следующем виде:

$$t = \frac{10000}{12,09 + 0,0843w - 0,0244d} - 273, \quad (7)$$

где:  $t$  — температура возникновения подслоя, в  $^\circ\text{C}$ ;

$w$  — скорость газов, в м/сек;  
 $d$  — наружный диаметр трубы, в мм.

В формуле (7) сохраняется зависимость  $t$  от скорости газов и диаметра трубы, как основных факторов, которые можно задавать и изменять при проектировании. Представление зависимости  $t$  от скорости только линейным членом упрощает расчет и практически не искажает результата. При составлении формулы (7) температура газов принималась равной  $630^{\circ}\text{C}$ . По формуле (5) более высокой температуре газов соответствует и повышенное значение температуры возникновения подслоя. Поэтому взятая температура газов ( $630^{\circ}\text{C}$ ) соответствует сравнительно неблагоприятным условиям и формула (7) допускает оценку возможности образования подслоя и при более высоких температурах газов, причем она дает значение  $t$  с некоторым запасом. При составлении формулы (7) коэффициент избытка воздуха принимался равным 1,5, а характеристики летучей золы  $\delta_{\text{з}}=30$  мкн и  $\lg\sigma=0,3$  (остаток на сите размером 88 мкн 5,5%). Для наглядности и облегчения расчета на фиг. 8 приведена зависимость температуры возникновения подслоя от скорости газов и диаметра трубы, рассчитанная на формуле (7).



Фиг. 8. Температура возникновения подслоя в зависимости от скорости газов и наружного диаметра трубы.

## V. РОЛЬ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ

Действие пограничного слоя можно охарактеризовать двумя обстоятельствами:

1. Пограничный слой существенно не влияет на движение крупных частиц и поэтому они почти полностью сохраняют свое разрушительное и изнашивающее действие;

2. Пограничный слой сильно тормозит мелкие осаждающиеся фракции. Часть из них, особенно мелких, теряет полностью свою скорость и не принимает участия в процессе инерционного осаждения.

В результате этих двух обстоятельств образование окаменелости заторможено в областях затаенных пограничным слоем. При этом все же остается возможность медленного образования окаменелостей, которые в этом случае могут оказаться очень прочными ввиду относительно усиленного селективирующего действия крупных фракций.

При наших опытах в канал была установлена неохлаждаемая продольноомываемая труба. Поскольку вокруг продольнообмываемой трубы образуется значительный пограничный слой, то можно было ожидать, что существенного образования окаменелости не произойдет. Осмотр трубы после опытов продолжительностью 200—500 час. (скорость газов в пределах 5—15 м/сек, температура газов в пределах 600—680°C) подтвердил, что действительно крупных окаменелостей на продольноомываемой части трубы не было. Наблюдалась только мелкие окаменелости размером 10—20 мм и высотой 2—4 мм, которые размещались подобно маленьким островкам на поверхности трубы. Вероятно, что в течение более длительного времени они увеличивались бы далее, причиняя более полное загрязнение трубы, но скорость эта значительно меньше скорости образования гребней окаменелости при поперечном потоке, которая в благоприятных условиях достигает 2—4 мм в течение одного часа (табл. 1).

### ВЫВОДЫ

1. Образование окаменелостей летучей золы определяется химическими и механическими условиями. Оно может начаться прямо от поверхностей труб, если температура их стенок достаточно высокая.

2. При проектировании поперечноомываемых трубных

пучков можно в первом приближении определить вероятность образования окаменелости на трубах при помощи формулы (7) или по фиг. 8. При этом следует учесть, что полученное значение  $t$ , особенно при невысоких температурах газов, не имеет запаса. Во избежание образования окаменелостей на поверхности нагрева требуется, чтобы температура стенок труб была по меньшей мере на 20—30°C ниже значения, рассчитанного по формуле (7) или по фиг. 8.

3. В случае опасности образования окаменелостей не рекомендуется применять поперечноомываемые трубные пучки, так как процесс окаменения способствует быстрому забиванию газохода и значительно затрудняет условия очистки. В благоприятных условиях образования окаменелостей обдувка оказывается неэффективной.

4. В случае опасности образования окаменелостей рекомендуется применять продольноомываемые компановки поверхностей нагрева (трубные пучки и ширмовые пароперегреватели) с предусмотрением одновременно хорошего доступа для очистки.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. И. П. Эпик, О проектировании котельных агрегатов с учетом процессов спекания летучей золы сланца-кукерсита. Труды Таллинского политехнического института, Серия А № 64, 1955.
2. Н. А. Фукс, Механика аэрозолей. Москва, изд. АН СССР, 1955.
3. Н. Г. Залогин, Известия ВТИ № 8, 1952.
4. G. H. Matthaei, Die Wärme Nr. 41, 1940.
5. H. Lenkewitz, Braunkohle, Wärme und Energie, Heft 11/12, 1955.
6. P. H. Grumley, Journ. Inst. Fuel., vol. 28, Nr. 170, 1955.
7. W. Gumz, BWK Bd. 8, Nr. 3, 1956.
8. H. E. Crossley, Journ. Inst. Fuel., vol. XXV, Nr. 145, 1952.

И. Микк  
ОБ ОБРАЗОВАНИИ ОТЛОЖЕНИЙ И ОКАМЕНЕЛОСТЕЙ  
ЛЕТУЧЕЙ ЗОЛЫ НА ТРУБАХ

Издательство  
Таллинского Политехнического Института

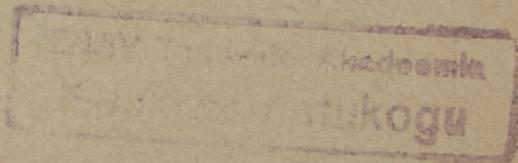
\*

Редактор Я. И в а н д  
Технический редактор А. Т а м м  
Корректор У. С о о д л а

Сдано в набор 6 IV 1957 г. Подписано к печати 6 V 1957 г. Бумага  
54×84<sup>1/16</sup>. Печатных листов 1,5. По формату 60×92 печатных  
листов 1,23. Учетно-издательских листов 1,18. Тираж 800. МВ-03175.  
Заказ № 1245.

Типография «Юхисэлу», Таллин, ул. Пикк 40/42.

Цена 85 коп.





Цена 85 коп.