

р. 6.7  
226

TALLINNA POLÜTEHNILISE  
INSTITUUDI TOIMETISED

ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

СЕРИЯ А

№ 226

# ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

СБОРНИК СТАТЕЙ

IV

Под общей редакцией проф. И. П. Эпика



Ер.6.7

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED  
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

СЕРИЯ А

№ 226

1966

УДК 621. 180

# ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

СБОРНИК СТАТЕЙ

IV

Под общей редакцией проф. И. П. Эпика

Ер.6.7

ТАЛЛИН 1966

СОДЕРЖАНИЕ

1. Х. Х. Арро, В. Э. Валликиви, А. В. Прикк, Э. Я. Ратник, А. Х. Рейер, И. П. Эпик. Исследование летучей золы назаровского угля и ее отложений на поверхностях нагрева котлоагрегата	3
2. А. А. Отс. Баланс серы при сжигании эстонских горючих сланцев	17
3. Л. М. Ыйспуу. Использование диаграммы Колмогорова-Фай-Желева при исследовании некоторых рассевов эстонских горючих сланцев	29
4. Х. А. Роорайд. Об осаждении частиц пыли на ширмовую поверхность	45
5. П. И. Ансон, Я. П. Лайд, А. П. Пообус. Исследование воздействия высоких температур на пластические свойства стали X25I	55



Er. 7125

УДК 621. 180. 001. 5

*Х. Х. Арро, В. Э. Валликиви, А. В. Прикк,  
Э. Я. Ратник, А. Х. Рейер, И. П. Эпик*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ЛЕТУЧЕЙ ЗОЛЫ НАЗАРОВСКОГО УГЛЯ И ЕЕ ОТЛОЖЕНИЙ НА ПОВЕРХНОСТЯХ НАГРЕВА КОТЛОАГРЕГАТА**

Как показывает опыт эксплуатации котлоагрегатов, сжигающих назаровские угли, работа их в основном лимитируется загрязнением конвективных поверхностей нагрева. Опасность забивания газоходов золовыми отложениями приводит к снижению паропроизводительности котлов, а также требуются частые остановки котлов на очистку.

Процесс загрязнения поверхностей нагрева, как известно, имеет весьма сложный характер и зависит как от минерального состава топлива, так и от физических условий в котлоагрегате во время его работы [1, 2, 3]. Имеющиеся в настоящее время данные о механизме образования плотных золовых отложений при сжигании назаровских углей являются недостаточными для определения оптимальных условий работы котлоагрегатов и обеспечения вполне надежной работы при номинальных нагрузках, а также затрудняется создание новых, более мощных котлоагрегатов.

В настоящей статье рассматриваются результаты исследований, проведенных на базе котлоагрегатов ПК-38, с целью изучения процессов загрязнения конвективных поверхностей нагрева при сжигании назаровского угля. Исследования проводились путем химических, термографических, рентгеноструктурных и оптических анализов проб отложений и летучей золы. Кроме того был проведен ряд опытов с помощью специальных труб-зондов для исследования начальной стадии образования отложений. Опыты и отбор проб проводились как на котлах типовой конструкции, так и на реконструированном котле, который отличается от первых опущенным подом топки, аэродинамическим выступом на задней стенке топки, боковыми щелевыми горелками и дробеметами вместо течек в поворотной камере.

## Характеристика отложений на поверхностях нагрева

Ввиду того, что у котлоагрегатов ПК-38 наиболее опасным местом с точки зрения загрязнения является пакет промежуточного пароперегревателя II ступени, основное внимание при исследованиях заслужили отложения, взятые с труб промежуточного пароперегревателя II ступени и ширмового пароперегревателя.

Отложения на пароперегревателях имели явно выраженную слоистую структуру. Самым нижним, прилегающим к слою окислов металла труб, являлся красный твердый слой толщиной 1—3 мм. Часто наблюдалось, что красный слой состоит из нескольких, немного отличающихся по окраске слоев. Над красным слоем наблюдался желтовато-бурый, также твердый слой, над которым находились бурые или серые гребни. Прочность гребней была относительно небольшая. Надо отметить, что длинные гребни отложений наблюдались в основном на ширмовых пароперегревателях, в то время как на конвективных пароперегревателях, очищаемых дробевым способом или паровой обдувкой, наружным слоем отложений в большинстве случаев являлся желтовато-бурый, нетолстый твердый слой.

В ходе исследований удалось однако наблюдать случай быстрого забивания пакета промежуточного пароперегревателя II ступени золовыми отложениями. В этом случае находившиеся на пакете отложения представляли собой непрочные гребни длиной 20—60 см серого цвета, местами с желтовато-бурым оттенком.

### Исследование процесса загрязнения с помощью зондов

Опыты с помощью охлаждаемых воздухом зондов проводились при нагрузках котлов 160—270 т/ч, с продолжительностью по 5—6,5 часов. При опытах зонд был вставлен в поворотную камеру котла между ширмовым и промежуточным пароперегревателем II ступени.

Результаты этих опытов показывали, что важное значение при образовании отложений имеет температура дымовых газов в поворотной камере. Так, например, наблюдалось при нагрузках котла до 200 т/ч, когда температуры дымовых газов в поворотной камере по щитовому прибору не превышали 800—820°C, а по выведенной из передней части зонда термопары 870—880°C, что на зонд оседали только очень мелкие частички летучей золы, которые образовывали желтый, непрочный связанный тонкий слой. Повышение температуры дымовых газов при одном опыте по щитовому прибору до 840°C

(по термопаре зонда до  $906-926^{\circ}\text{C}$ ) при нагрузке котла  $170-180$  т/ч вызывало однако образование на фронтальной стороне зонда непрочного гребня отложения, высотой до  $20$  мм. Надо отметить, что гребень образовывался непосредственно на металле трубы, без заметного подслоя. Одновременно с образованием гребня наблюдалось также общее загрязнение котла. Причиной повышения температур дымовых газов в поворотной камере по-видимому являлась работа котла на малом избытке воздуха.

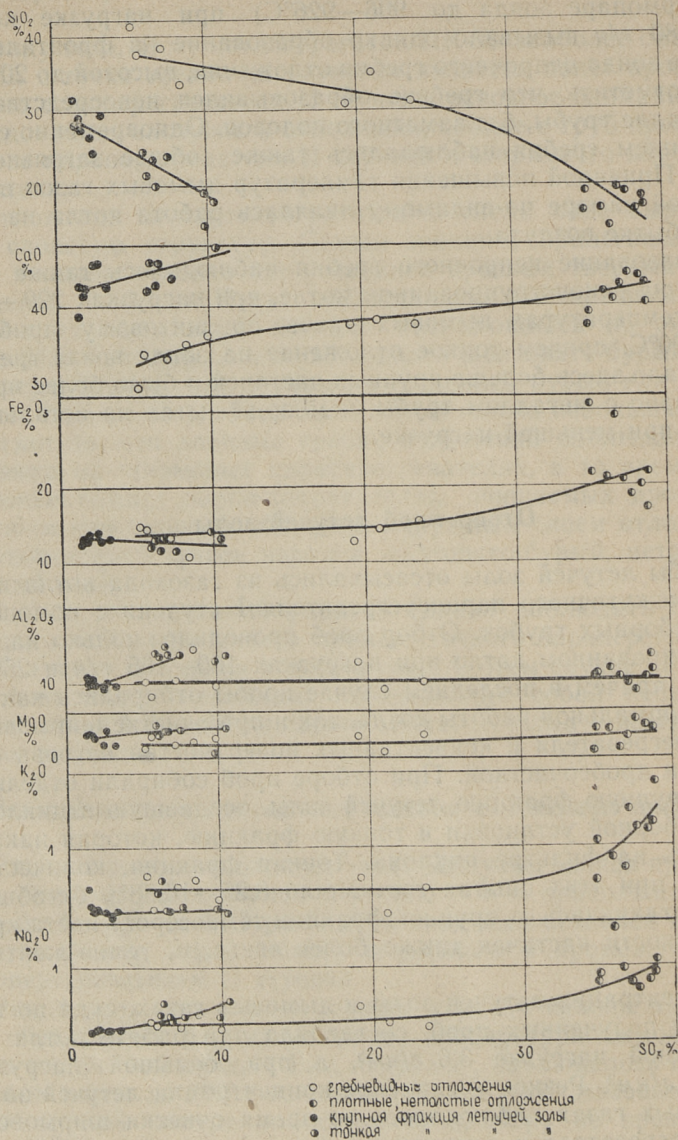
Образование непрочного гребня наблюдалось также при опытах на реконструированном котле, при нагрузках  $220-270$  т/ч и температурах дымовых газов по щитовому прибору  $820-900^{\circ}\text{C}$ , причем тонкое отложение на зонде возле гребня содержало здесь больше крупных частичек и было более прочно связано с металлом трубы, чем при опытах на остальных котлах при меньшей нагрузке.

### Отбор проб летучей золы

Пробы летучей золы отсасывались из газохода котла после промежуточного пароперегревателя I ступени с помощью пробоотборных трубок. Отбор проб проводился только на реконструированном котле при нагрузках  $160-165$  т/ч и  $250-270$  т/ч, причем в последнем случае пробы отбирались как во время нормальной работы котла, так и при очистке ширмового пароперегревателя и конвективных поверхностей нагрева обдувкой и дробеочисткой. При отборе проб собирали отдельно более крупную фракцию летучей золы, оседавшую в циклоне пробоотборной установки и тонкую фракцию, которая накапливалась на фильтре циклона. Тонкая фракция, количество которой при этих опытах составляло  $8,25-16,88\%$  от общей пробы, отличалась от крупной фракции темносерого цвета кроме крупности частичек также более светлым, темно-желтым цветом.

Концентрация летучей золы в дымовых газах, судя по количеству полученных проб, составляла при работе котла на пониженной нагрузке  $3,6$  г/м<sup>3</sup>, а при большой нагрузке  $5,0-6,5$  г/м<sup>3</sup>. Резкое увеличение концентрации летучей золы в дымовых газах наблюдалось во время очистки ширмового пароперегревателя и конвективных поверхностей нагрева, достигая  $10,1$  г/м<sup>3</sup>.

На основе полученных данных вычисляли количество летучей золы, осевшей на поверхностях нагрева от топки (за исключением) до места отбора пробы за время работы котла между двумя обдувками и удаляемой последующей обдувкой.



Фиг. 1. Содержание основных химических компонентов (в процентах от общей суммы компонентов за исключением  $SO_3$ ) в пробах летучей золы и отложений в зависимости от содержания  $SO_3$  сульф в них



При настоящем опыте это количество составляло примерно 10—15% от общего количества летучей золы, выносимой дымовыми газами из топки.

### Результаты химических анализов проб

Результаты химических анализов проб показывают, что по химическому составу отложения можно распределить в две группы: а) отложения, содержащие сульфатной  $\text{SO}_3$  35% и более и  $\text{SiO}_2$  около 10—12% и б) отложения, содержание  $\text{SO}_{3\text{сульф.}}$  в которых обыкновенно не превышает 24%, а  $\text{SiO}_2$  не менее 24%. Характерно, что в первую группу относятся твердые, нетолстые фронтальные отложения (красные или желтовато-бурые), а в состав второй группы в основном входят менее прочные, серые или бурые гребни отложений. Для более точной характеристики отложений и проб летучей золы по химическому составу и выяснения значения отдельных компонентов летучей золы в процессе загрязнения, ниже приводятся данные о распределении химических компонентов в пробах летучей золы и отложений. Наиболее целесообразным в данном случае является рассмотрение химического состава проб в зависимости от содержания сульфатной  $\text{SO}_3$  в пробах, так как прочность и общий характер отложений по-видимому во многом зависит от содержания  $\text{SO}_3$  в них.

На фиг. 1 представлено содержание основных химических компонентов в зависимости от содержания  $\text{SO}_{3\text{сульф.}}$  в разных пробах отложений и летучей золы. Ввиду того, что увеличение количества  $\text{SO}_3$  в пробах сопровождается относительным уменьшением содержания остальных компонентов, что затрудняет определение действительного значения одного или другого компонента, то приведенные на фиг. 1 концентрации отдельных компонентов соответствуют не действительному содержанию их в пробах, а процентному содержанию данного компонента в сумме всех компонентов за исключением  $\text{SO}_3$  (содержанию в бессульфатной массе).

Надо также отметить, что  $\text{TiO}_2$ , которая по литературным данным на процесс образования отложений значительного влияния не имеет, отдельно не определялась и представленное содержание  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в пробах является суммой  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$ . По данным И. К. Лебедева и В. Н. Смирнского содержание  $\text{TiO}_2$  в отложениях и летучей золе колеблется в пределах 0,6—1%. Также проводятся данные о содержании железа в пробах в пересчете на  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

Из представленных на фиг. 1 данных вытекает, что различие между твердыми, нетолстыми отложениями и непрочными гребнями отложений заключается не только в разном количе-

стве  $\text{SO}_3$  в них, а в разном химическом составе вообще. Так, например, содержат непрочные гребни  $\text{SiO}_2$  примерно в два раза больше, чем твердые, нетолстые отложения. В последних, наоборот, наблюдается повышение содержания таких компонентов как  $\text{CaO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  и  $\text{Na}_2\text{O}$ , в то время как количество  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{MgO}$  в обоих типах отложений является почти одинаковой.

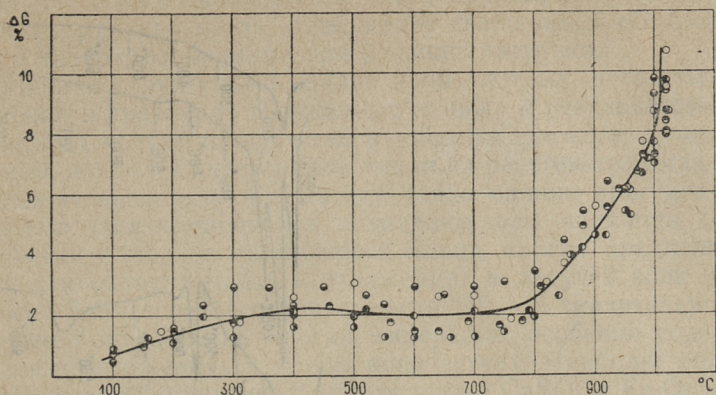
В пробах летучей золы заметно, что тонкие фракции значительно больше содержат сульфатную  $\text{SO}_3$ , чем крупные фракции, причем содержание  $\text{SO}_3$  по-видимому зависит от нагрузки котла. Так, например, колеблется  $\text{SO}_3$  в пробах, отобранных при нагрузках котла 250—270 т/ч, в крупных фракциях 1,3—1,8% и в тонких фракциях 5,9—8,2% (суммарно в пробах 1,7—2,3%), в то время как в пробах, полученных при нагрузках 160—165 т/ч, количество  $\text{SO}_3$  составляет соответственно 2,4—2,6% и 9,8—10,5% (суммарно 3,6—3,7%). В пробах, отобранных во время обдувки котла после работы при нагрузках 250—260 т/ч, крупная фракция содержит 3,2%  $\text{SO}_3$  и тонкая фракция 7,5% (суммарно 3,6%).

Надо сказать, что изменение содержания в зависимости от нагрузки котла наблюдается также у некоторых других компонентов золы. Так, например, увеличивается при малых нагрузках количество  $\text{CaO}$  и  $\text{Na}_2\text{O}$  в золе и уменьшается  $\text{SiO}_2$ .

Что касается распределения компонентов золы между фракциями, то из представленных на фиг. 1 данных видно, что в пробах тонкой фракции по сравнению с пробами крупной фракции увеличивается содержание  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{Na}_2\text{O}$ . Крупная фракция, наоборот, содержит больше  $\text{SiO}_2$ . В остальных компонентах заметной разницы не наблюдается.

При сравнении представленных на фиг. 1 данных распределения компонентов во фракциях летучей золы и отложений, можно сказать, что по тенденции изменения содержания основных компонентов в пробах некоторое сходство имеют — крупная фракция золы с гребнями отложений и тонкая фракция с твердыми, нетолстыми отложениями. Внимания заслуживает однако обстоятельство, что соотношение  $\text{Fe}_2\text{O}_3:\text{CaO}$ , величина которого в крупной фракции золы больше, чем в тонкой фракции, в плотных нетолстых отложениях также имеет величину больше величины в гребнях.

Плотные, нетолстые отложения имеют еще одну особенность по сравнению с пробами летучей золы и гребней отложений. Определение потерь при прокаливании показывало, что величина этого показателя в пробах плотных отложений значительно выше, чем во всех остальных пробах, где, несмотря на значительное содержание  $\text{SO}_3$  в некоторых, потери не превышают 1,4%. Кривая изменения веса этих проб (при средней



Фиг. 2. Убыль в весе проб плотных нетолстых отложений при нагревании.

скорости подъема температуры около 10 град/мин), представленная на фиг. 2, показывает, что уменьшение веса начинается при температурах 700—800°C и составляет после нагревания при 1000°C до постоянного веса около 10%. По данным химических анализов из проб в основном улетучивается  $\text{SO}_3$ . Из сульфатов, наличие которых в пробах по химическому составу отложений в достаточном количестве для таких потерь возможно, разлагается по литературным данным [1, 4] при 700—800°C только  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  (температура разложения  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$  ниже, а  $\text{CaSO}_4$  и  $\text{MgSO}_4$  выше этих пределов).

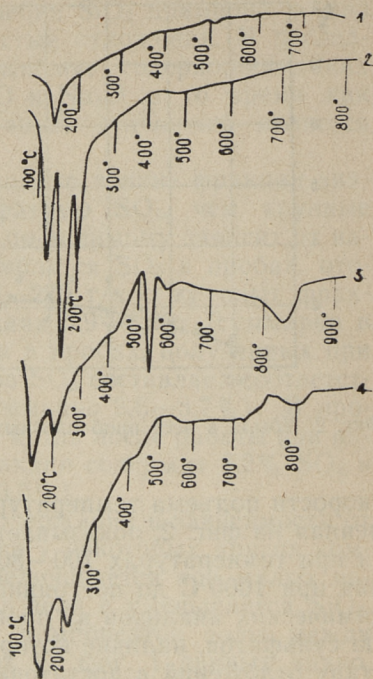
Однако, учитывая более резкое увеличение относительного содержания  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  в этих отложениях, в то время, как количество  $\text{Al}_2\text{O}_3$  не отличается от количества ее в гребнях отложений, не исключена и возможность, что разложение  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$  под влиянием других компонентов золы происходит при более высоких температурах.

### Результаты термографических, рентгеноструктурных и оптических анализов проб

Как показывают результаты термографического анализа, различия в характере проб отложений и летучей золы, наблюдаемые по результатам химических анализов, отражаются также на термограммах. По общему характеру термограмм хорошо заметна разница между пробами твердого, нетолстого отложения и гребней, а также между пробами крупной и тонкой фракции летучей золы. Наиболее характерные термограммы обработанных водой проб отложений и летучей золы представлены на фиг. 3.

Фиг. 3. Термограммы предварительно гидратированных проб летучей золы и отложений:

1 — гребень отложений, 2 — плотное нетолстое отложение, 3 — крупная фракция летучей золы, 4 — тонкая фракция летучей золы



На основе термограмм проб отложений можно сказать, что в составе плотных, нетолстых отложений значительное место имеют сульфатные соединения, особенно ангидрит. Совершенно иная картина наблюдается на термограммах гребней отложений. Незначительные и искаженные эффекты ангидрита, несмотря на более 20%-ое содержание сульфатной  $SO_3$  в некоторых пробах, свидетельствует о том, что большая часть  $CaSO_4$  в этих отложениях должна находиться не в виде ангидрита, а в составе более сложных соединений, которые при предварительной обработке проб меньше реагируют с водой. Наличие сульфатов Fe или Al в этих пробах мало вероятно, что доказывается также малыми потерями при прокаливании.

На термограммах проб летучей золы наибольший интерес представляет эндотермический эффект дегидрата  $Ca(OH)_2$  при 510—540°C, характеризующий количество свободной CaO в пробах. Судя по величине этого эффекта, пробы тонкой фракции летучей золы содержат свободный CaO в незначительном количестве и свободная CaO в основном находится в крупной фракции золы, несмотря на то, что относительное содержание общей CaO в этой фракции меньше, чем в тонкой фракции

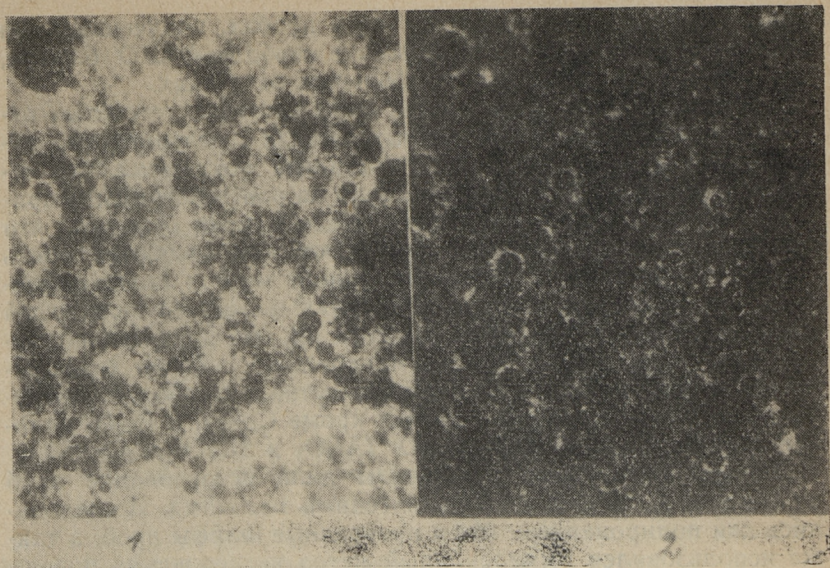
(фиг. 1). Также наблюдается, что в пробах, полученных при малых нагрузках котла, содержание свободной СаО больше, чем в пробах, отобранных при больших нагрузках.

Рентгеноструктурный анализ проб плотных, нетолстых отложений и сравнение полученных данных с результатами химического и термографического анализа показывал, что основные, наиболее интенсивные линии на рентгенограммах принадлежат ангидриту и гематиту. Надо однако отметить, что линиями этих компонентов совпадают или являются очень близкими наиболее интенсивные линии многих предполагаемых или обнаруженных в отложениях и летучей золе углей Канско-Ачинского бассейна веществ [5], что значительно затрудняет определение многих минералов, особенно содержащихся в отложениях в малых количествах. Наиболее определено было обнаружено в пробах кроме  $\text{CaSO}_4$  и  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  наличие  $\text{MgSO}_4$ ,  $\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ;  $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ .

Весьма интересные результаты дало исследование проб отложений и летучей золы оптическими методами. Исследовались как полированные, так и прозрачные шлифы проб, а также использовался иммерсионный метод исследования порошкообразных проб.

Под микроскопом наблюдалось, что основное составляющее вещество красного слоя плотных, нетолстых отложений состоит из весьма тонких ( $\leq 1$  мкм) буровато-красных или черных шарообразных частичек, которые связываются прозрачным, частично аморфным, частично кристаллическим веществом. В этой основной буровато-красной массе имеются в виде включений гнезда разных очертаний, заполненные более крупными (10—30 мкм, иногда и больше) черными или бурыми непрозрачными шариками, вокруг которых образовывались кристаллические оболочки толщиной около 2—10 мкм. Эти оболочки состоят из отдельных кристалликов, ни в чем не отличающихся от составляющих связывающее вещество основной массы отложений. Обычно оболочки соседних шариков сливаются и образуют кристаллический фон для изотропных шариков. Определение оптических констант кристаллов оболочки иммерсионным методом дало результат, по которому средний показатель преломления  $N_m$  их соответствует  $N_m$  ангидрита (1,57—1,58). Довольно часто в этих гнездах встречаются и обломки кварца. Чем дальше от слоя окислов металла труб, тем больше таких включений находятся в основной мелкозернистой массе отложений.

Исследование проб менее плотных отложений-гребней показывало, что их строение значительно отличается от строения плотных, нетолстых отложений. Основная масса этих отложений состоит из довольно густо расположенных, более круп-



Фиг. 4. Окруженные кристаллическими оболочками шарообразные частички гребня отложений (проходящий свет, увеличение 145):  
1 — без анализатора, 2 — с анализатором

ных частичек, представляющих с собой черные или бурые шарики со средним диаметром около 15 мкм, вокруг которых отчетливо заметны тонкие кристаллические оболочки (фиг. 4). В зависимости от густоты расположения шариков, их оболочки либо сливаются, либо нет. Этим можно и объяснить рыхлость данных отложений. По показателю преломления оболочки состоят из кристалликов ангидрита. Другим часто встречающимся компонентом в этих отложениях являются обломки разных размеров, представляющие собой в основном  $\beta$ - $\text{SiO}_2$ . Исследование гребней отложений, образовавшихся при кратковременных опытах на зондах показывал, что в этих отложениях кристаллические оболочки вокруг шарообразных частичек или являются едва заметными, или отсутствуют вообще. Учитывая вышесказанное, а также, что вокруг частичек летучей золы оболочек не наблюдалось, можно сказать, что образование кристаллических оболочек и их срастание происходит главным образом после оседания частичек летучей золы на поверхностях нагрева.

Исследование проб летучей золы показывало, что фракции летучей золы состоят в основном из шаровидных изотропных частичек, которые, судя по их форме, по крайней мере частич-

но проходили жидкую фазу. Цвет шариков варьируется от бесцветного до черного, причем тонкая фракция золы состоит из более светлых частичек. Определение показателя преломления дало результаты, по которым последний колеблется в широких пределах (1,55—170 и более). Это показывает, что шарики не имеют стехиометрически определенного химического состава. Кроме шаровидных частичек в пробах летучей золы наблюдались обломки  $\alpha$ - и  $\beta$ - $\text{SiO}_2$  и ортоклаза.

Микрохимическое определение свободной  $\text{CaO}$  в пробах летучей золы с помощью раствора фенола в нитробензоле дало результат, по которому образование кристаллического фенолята кальция наблюдалось только вокруг некоторых более крупных шарообразных частичек.

### Заключение

Проведенные исследования процесса загрязнения поверхностей нагрева котлоагрегатов ПК-38 показывают, что при сжигании назаровских углей на конвективных и ширмовых поверхностях нагрева может произойти образование двух типов связанных золотых отложений.

Отложения первого типа являются менее прочными, иногда почти рыхлыми и представляют собой обыкновенно бурые или серые гребни. Слоистая структура у этих отложений не наблюдается.

Второй тип отложений представляет собой нетолстые плотные отложения со значительной прочностью и слоистой структурой. Нижние, прилегающие к трубам слои этих отложений являются обыкновенно буровато-красными. Наружные слои имеют в основном желтовато-бурую, иногда серую окраску.

Образование отложений второго типа происходит обыкновенно весьма медленно. Первый тип отложений, наоборот, может при благополучных условиях расти со значительной скоростью и являться причиной быстрого забивания конвективных пучков котла. Предпосылкой для образования отложений первого типа является повышение температур в поворотной камере, причем эти отложения могут расти, как показывали опыты с зондами, не только на плотных отложениях, а также непосредственно на металле трубы без заметного подслоя.

Влияет ли на ускоренное образование гребневидных отложений при работе котла на малом избытке воздуха только повышение температур в поворотной камере или играет здесь роль также более восстановительная среда в топке, где проис-

ходит разложение минеральной части топлива и образование золовых минералов, пока не известно.

На основе полученных данных исследований можно для обоих типов отложений представить нижеследующие механизмы образования.

Плотные, нетолстые отложения, основным связывающим веществом в которых является  $\text{CaSO}_4$ , образуются по данным химических и оптических исследований главным образом за счет самых тонких фракций летучей золы. Образование связывающего  $\text{CaSO}_4$  должно по-видимому произойти непосредственно на поверхностях нагрева, так как частички сульфатов, в частности  $\text{CaSO}_4$  и  $\text{K}_2\text{SO}_4$ , по результатам опытов, проведенных в Таллинском политехническом институте при нагревании до  $600^\circ\text{C}$ , очень плохо связываются как с металлом, так и между собой и основное связывание частичек происходит при сульфатизации окисей под влиянием  $\text{SO}_2$ . Учитывая однако, что количество свободной  $\text{CaO}$  в тонкой фракции золы незначительное, а также относительно высокое содержание  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  в этих отложениях, можно предполагать, что кроме свободной  $\text{CaO}$  в образовании отложений участвуют также соединения с более высоким содержанием  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , возможно ферриты кальция, которые под влиянием  $\text{SO}_2$  разлагаются, образуя  $\text{CaSO}_4$  и  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Медленное образование твердых, нетолстых золовых отложений можно таким образом объяснить малым количеством соответствующих компонентов в тонкой фракции летучей золы, с одной стороны, а также возможным медленным протеканием процесса разложения содержащих железо компонентов, с другой стороны.

Гребневидные отложения образуются главным образом за счет крупной фракции золы. Образование отложений этого типа можно представить следующим образом: при повышении температуры дымовых газов и, следовательно, частичек летучей золы, возрастает их склонность к прилипанию. Увеличенная склонность к прилипанию наблюдается по-видимому в первую очередь у частичек, состоящих из более легкоплавких силикатов. Возможно также, что более восстановительная среда при работе котлоагрегата на малом избытке воздуха способствует образованию таких частичек.

Из-за значительного количества частичек в золе, способных к прилипанию к поверхностям нагрева, происходит быстрое образование и рост гребней. Так как силы сцепления между частичками являются небольшими и отложения неплотными, прочность отложений в этой стадии образования является незначительной и отложения относительно легко очищаемыми. При более длительном пребывании отложений в газоходах происходит вторичный процесс, в результате чего увеличива-



ется содержание сульфатной  $\text{SO}_3$  в отложениях и вокруг частичек образуются оболочки  $\text{CaSO}_4$  за счет свободной  $\text{CaO}$  в более крупных частичках золы. Срастание оболочек отдельных частичек приводит к увеличению прочности отложений.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Р. С. Прасолов. Массо- и теплоперенос в топочных устройствах. Изд. «Энергия», 1964.
2. R. Quack. BWK 15 (1963) № 8.
3. Проблемы использования тепловыми электростанциями углей Канско-Ачинского бассейна (хроника). «Теплоэнергетика» № 10, 1963.
4. W. Gumz, H. Kirsch, M. Maskowsky. Schlackenkunde. Springer-Verlag, 1958.
5. Н. А. Синайский, А. Г. Меркулов, М. С. Шарловская. «Теплоэнергетика» № 12, 1964.



УДК 21. 18:662. 67:662. 613. 001. 5

А. А. Отс

## БАЛАНС СЕРЫ ПРИ СЖИГАНИИ ЭСТОНСКИХ ГОРЮЧИХ СЛАНЦЕВ\*

Одним из факторов, влияющим на интенсивность загрязнения поверхностей нагрева котлоагрегатов сульфатными отложениями при сжигании эстонских горючих сланцев в пылевидном состоянии, является концентрация двуокиси и триокиси серы в дымовых газах (содержание триокиси серы в продуктах сгорания значительно меньше, чем содержание двуокиси серы). От количества  $SO_2$  и  $SO_3$ , выбрасываемых в атмосферу с продуктами сгорания, зависит высота дымовых труб и санитарные условия в районе их расположения.

Сера в твердых топливах встречается в трех видах: органическая сера  $S_{ор}$ , колчеданная сера  $S_k$  и сульфатная сера  $S_c$ . Сульфатной серы (главным образом в виде гипса —  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ) в эстонских горючих сланцах мало. По исследованиям Б. К. Торпана [1] количество сульфатной серы в отдельных пластах сланца колеблется в пределах  $S_c = 4-9\%$  (в среднем  $7\%$ ) от общего содержания серы в топливе ( $S_{ор} + S_k + S_c = 100\%$ ), а соотношение между количеством колчеданной (колчеданная сера в эстонских сланцах находится в виде марказита [2]) и органической серы в тех же пластах

лежит в пределах  $\frac{S_k}{S_{ор}} = 0,95-4,1$  (в среднем  $2,0$ ). При этом содержание марказитной серы приблизительно пропорционально содержанию органической части в топливе. По данным

Г. К. Саара [3] соотношение  $\frac{S_k^c}{O^c} \approx 0,042$ , где  $S_k^c$  — содержание марказитной серы в сухой массе топлива, %, а  $O^c$  — содержание органической части в сухой массе топлива, %.

В топочном объеме (имеется в виду сжигание топлив в пылевидном состоянии) в процессе соединения горючей серы

\* Химические анализы топлива и золы проводили инженеры А. Я. Махлапуу и В. Э. Валликиви.

( $S_{op} + S_k$ ) с кислородом образуются  $SO_2$  и  $SO_3$ . Как известно, в топке с неорганической частью топлива происходят различные физико-химические изменения, в результате чего образуются активные компоненты золы, способные соединяться с образующимся при сгорании топлива двуокиси и триоксида серы. Эти процессы соединения могут происходить как в топочном пространстве, так и в высокотемпературных газоходах котла. Также вероятно, что некоторое количество горючей серы соединяется с названными активными компонентами золы в процессе гетерогенного горения топлива. Поскольку связанные сульфатные отложения содержат в 3—10 раз больше серы, чем летучая зола (при сжигании эстонских сланцев), то можно предполагать, что некоторое количество  $SO_2$  и  $SO_3$  связывается с летучей золой на поверхностях нагрева котлоагрегата в процессах образования связанных сульфатных отложений. Значит, часть органической и марказитной серы переходит в состав дымовых газов. Другая же часть серы остается в виде твердых соединений в золе, шлаке и в отложениях на поверхности нагрева котлоагрегата. Учитывая относительно малую скорость роста отложений, можно сказать, что из серы, проходящей через газоходы котла, лишь незначительная часть переходит в отложения.

Степень связывания горючей серы с золой и шлаком зависит от целого ряда факторов, из которых в первую очередь необходимо отметить химический и минералогический состав золы и количество содержания серы в исходном топливе. Можно считать, что кроме отмеченных величин процесс соединения серы с активной частью золы зависит еще и от тепловой нагрузки топки, температуры факела, времени пребывания частиц топлива в топочном объеме и в газоходах, размера частиц топлива, коэффициента избытка воздуха и от некоторых других параметров.

В результате соединения серы с активной частью золы и шлака могут образовываться как сульфатные, так и сульфидные соединения. Соотношение между сульфатными и сульфидными соединениями в летучей золе и шлаке может зависеть от многих факторов, из которых наиболее важными являются состав и поля концентрации дымовых газов в топочном пространстве (коэффициент избытка воздуха, восстановительные зоны), условий массообмена между частицами золы и газовой среды, а также и от химического и минералогического состава золы, температуры среды и других факторов.

При сжигании эстонских горючих сланцев основным активным компонентом в золе и шлаке, который способен связывать  $SO_2$  и  $SO_3$ , является свободная известь [4], образовав-

шаяся в топочном процессе при диссоциации кальцита ( $\text{CaCO}_3$ ) и доломита ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ). В сланцевых золах и шлаках сера встречается главным образом в виде сульфатов. Связывание  $\text{SO}_2$  и  $\text{SO}_3$  минеральными компонентами золы подтверждается также количеством сульфатной серы в летучей золе и шлаке, где содержание сульфатов значительно больше, чем можно было ожидать по содержанию их в неорганической части сланцев. Содержание же сульфидной серы при нормальном топочном режиме обычно в десять и более раз меньше содержания сульфатной серы в золовых остатках.

Исходя из содержания  $\text{SO}_2$  и  $\text{SO}_3$  в продуктах сгорания, было установлено [4], что степень улетучивания горючей серы при сжигании сланцев в котле БКЗ 75—39Ф находится в пределах

$$K_s = \frac{S^л}{S_{\text{оп}} + S_{\text{к}}} = 0,35 - 0,45, \quad (1)$$

где  $S^л$  — количество серы в дымовых газах.

Целью данной работы являлось исследование содержания серы в золовых остатках в зависимости от общего содержания серы в топливе при различных нагрузках котлоагрегата, а также определение степени улетучивания общей серы.

Опыты были проведены на котлоагрегате высокого давления типа ТП-17 (паропроизводительность 220 т/ч, давление перегретого пара 100 атм и температура перегретого пара 540°C) в интервале паропроизводительности котла 125—185 т/ч. Во время проведения опытов сжигались эстонские горючие сланцы открытой добычи из карьера № 1 «Сиргала» с располагаемой теплотой сгорания рабочей массы  $Q_p^p = 1583 - 2061$  ккал/кг. В течение опытов брались одновременно средние пробы летучей золы из газохода между экономайзером и воздухоподогревателем (при помощи отсосной трубки Альнера), средняя проба золы из бункера поворотной камеры между пароперегревателем и экономайзером, средняя проба шлака из холодной воронки и средняя проба топлива из течек топливных бункеров перед питателями сланца. Во время проведения опытов фиксировались данные, характеризующие работу котла: паропроизводительность, параметры перегретого пара, состав газов после пароперегревателя и воздухоподогревателя, температура газов за пароперегревателем, за экономайзером и за установкой, а также температура подогретого воздуха. На основе этих данных рассчитывался при каждом опыте коэффициент избытка воздуха в топке и температура газов на выходе из топки.

Поскольку температура газов за экономайзером относительно низкая (при проведении опытов колебалась в пределах

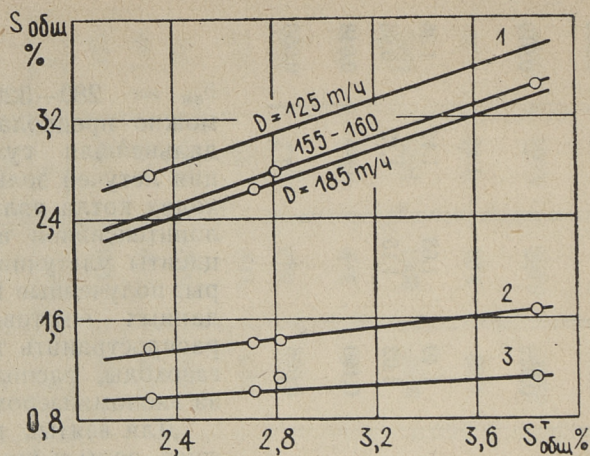
Таблица 1  
Баланс серы при сжигании эстонских сланцев в котле ТП-17

№№ пп	Наименование величин	Обозна- чение	Размер- ность	№ опыта			
				1	2	3	4
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Паропроизводительность котла	$D$	т/ч	185	155	160	125
2	Коэффициент избытка воздуха за топкой	$\alpha_T$	—	1,28	1,39	1,17	1,35
3	Средняя температура газов на выходе из топки	$\vartheta_T$	°С	1088	1002	1069	937
4	Влажность топлива	$W_P$	%	12,7	11,0	9,7	10,2
5	Зольность сухой массы топлива	$A^c$	%	51,2	50,3	51,7	52,9
6	Содержание карбонатной $CO_2$ в сухой мас- се топлива	$(CO_2)_k^c$	%	22,6	21,0	25,9	24,8
7	Располагаемая теплота сгорания рабочей массы топлива	$Q_P$	ккал/кг	2056	2061	1676	1583
8	Содержание общей серы в сухой массе топлива	$S_{общ}$	%	1,39	1,93	1,46	1,22
9	Содержание сульфатной серы в сухой мас- се топлива	$S_{сульфат}$	%	0,068	0,056	0,064	0,052
10	Соотношение	$\frac{S_{сульфат}}{S_{общ}}$	—	0,049	0,029	0,044	0,043
11	Содержание общей серы в летучей золе	$S_{общ}^{УВ}$	%	2,66	3,49	2,80	2,72

1	2	3	4	5	6	7	8
12	Содержание сульфидной серы в летучей золе	$S_{\text{Сульфид}}^{\text{СУ}}$	%	0,060	—	—	0,052
13	Соотношение	$\frac{S_{\text{Сульфид}}^{\text{СУ}}}{S_{\text{Общ}}^{\text{СУ}}}$	—	0,023	—	—	0,019
14	Содержание общей серы в золе из бункера поворотной камеры между экономайзером и пароперегревателем	$S_{\text{Общ}}^{\text{б}}$	%	1,40	1,68	1,42	1,35
15	Содержание общей серы в шлаке	$S_{\text{Общ}}^{\text{ш}}$	%	1,02	1,15	1,12	0,96
16	Содержание сульфидной серы в шлаке	$S_{\text{Сульфид}}^{\text{ш}}$	%	0,100	—	—	0,048
17	Соотношение	$\frac{S_{\text{Сульфид}}^{\text{ш}}}{S_{\text{Общ}}^{\text{ш}}}$	—	0,098	—	—	0,050

$\vartheta_{\text{ЭК}} = 280-320^{\circ}\text{C}$ ), то можно предполагать, что дальнейшая сульфатизация летучей золы в газоходах котла является малоинтенсивной и коэффициенты улетучивания серы, полученные на основе данных опытов, можно распространить также на газоходы, расположенные за экономайзером.

Для взятых проб топлива, золы и шлака было определено содержание общей серы, а для некоторых проб также содержание сульфатной серы. Содержание сульфидной серы определялось по разности между общей и сульфатной серой. Основные результаты опытов приведены в таблице 1. В таблице содержание серы в пробах золы и шлака дано на прокаленную массу (потеря при прокаливании определялась при температуре  $1000^{\circ}\text{C}$ ), а содержание серы в топливе на сухую массу сланца. Из приведенных данных видно, что в пробах сланца сульфатная сера составляет 2,9—4,9% от общей серы. Общее содержание серы в сухой массе топлива находится в пределах  $S_{\text{Общ}} = 1,22-1,93\%$  или пересчитанное на золу топлива  $S_{\text{Общ}}^{\text{T}} = 2,30-3,84\%$ .



Фиг. 1. зависимость общего содержания серы в летучей золе (1), в золе из поворотной камеры между пароперегревателем и экономайзером (2) и в шлаке (3) от общего содержания серы в топливе при различных паропроизводительностях котла

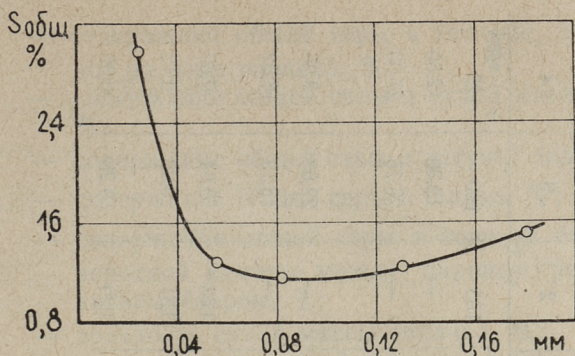
Содержание общей серы в летучей золе\*, в золе из бункера поворотной камеры и в шлаке зависит прямолинейно от общего содержания серы в топливе. Это видно на фиг. 1, где приведены указанные зависимости. На горизонтальной оси нанесено содержание общей серы в топливе, пересчитанное на количество золы в топливе, а на вертикальной оси содержание серы в золах и шлаке. Количество общей серы в летучей золе в 2,0—3,5 раза больше, чем в шлаке и в золе, получаемой из поворотной камеры.

Летучая зола имеет более мелкий гранулометрический состав, чем шлак и зола из поворотной камеры, что способствует более активному соединению ее с  $\text{SO}_2$  и  $\text{SO}_3$  за счет более высокой удельной поверхности. Для иллюстрации сказанного на фиг. 2 приведена зависимость общего содержания серы в летучей золе в зависимости от размера частиц. Кривая построена на основе определений серы в отдельных фракциях просеянной летучей золы. Оказывается, что мелкие фракции летучей золы содержат общей серы больше, чем крупные фракции.

С увеличением паропроизводительности котла (тепловой нагрузки) содержание общей серы в летучей золе уменьшается (фиг. 1). Повышение паропроизводительности котла

\* В дальнейшем в понятии «летучая зола» подразумевается зола, уловленная за экономайзером.





Фиг. 2. Зависимость содержания общей серы от размера частиц летучей золы

сопровождается увеличением количества крупной фракции в летучей золе и повышением температур в топке. Также уменьшается время пребывания частиц золы в топочном пространстве и газоходах котла. Эти причины, по-видимому, затрудняют протекание процесса сульфатизации летучей золы. Содержание общей серы в золе из бункера поворотной камеры и в шлаке от паропроизводительности котла практически не зависит.

Из данных, приведенных в табл. 1, следует, что из общего количества серы в летучей золе около 2—2,5% приходится на сульфиды. В шлаке соотношение сульфидной и общей серы колеблется в пределах 0,05—0,10, т. е. около 5—10% серы в шлаке приходится на сульфидную серу.

Поскольку содержание серы в летучей золе намного превышает содержание серы в шлаке, то степень улетучивания общей серы сильно зависит от количества летучей золы. Степень улетучивания общей серы была определена по выражению

$$K'_s = \frac{S_{\text{общ}}^{\text{л}}}{S_{\text{общ}} \frac{100}{A^c}} \quad (2)$$

При этом количество серы в газах в виде двуокиси и триоксида серы  $S_{\text{общ}}^{\text{л}}$  определяется уравнением

$$S_{\text{общ}}^{\text{г}} = S_{\text{общ}} \frac{100}{A^c} = a_{\text{ун}} S_{\text{общ}}^{\text{ун}} + (0,97 - a_{\text{ун}}) S_{\text{общ}}^{\text{ш}} + 0,03 S_{\text{общ}}^{\text{б}} + S_{\text{общ}}^{\text{л}}, \quad (3)$$

Таблица 2  
Баланс золы и коэффициент улетучивания серы при сжигании эстонских сланцев в котле ТП-17

№№ п/п	Наименование величин	Обозна- чение	Размер- ность	№ опыта			
				1	2	3	4
1	Паропроизводительность котла	$D$	т/ч	185	155	160	125
2	Содержание $\text{SiO}_2$ в сухой массе топлива	$\text{SiO}_2$	%	12,95	—	12,30	12,50
3	Содержание $\text{SiO}_2$ в летучей золе	$\text{SiO}_2^{\text{ун}}$	%	27,38	—	26,75	27,00
4	Содержание $\text{SiO}_2$ в золе из бункера поворотной камеры между экономайзером и пароперегревателем	$\text{SiO}_2^{\text{б}}$	%	22,70	—	22,63	18,96
5	Содержание $\text{SiO}_2$ в шлаке	$\text{SiO}_2^{\text{ш}}$	%	18,56	—	18,19	18,52
6	Доля золы топлива, уносимая газами по балансу $\text{SiO}_2$	$\alpha_{\text{ун}}$	—	0,75	0,63 *	0,64	0,60
7	Коэффициент улетучивания общей серы	$K'_s$	—	0,17	0,31	0,22	0,12
8	Коэффициент улетучивания общей серы при $\alpha_{\text{ун}} = 0,67$	$K'_s$	—	0,24	0,29	0,20	0,06

\* Определена интерполированием по кривой  $\alpha_{\text{ун}} = f(D)$ .

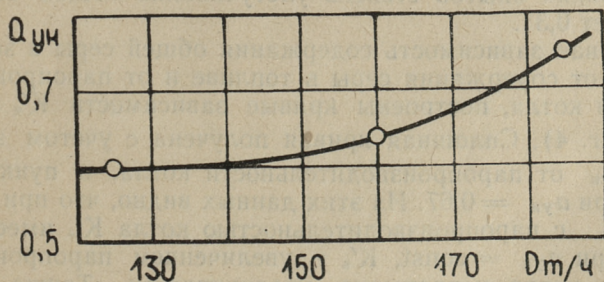
- где  $S_{\text{общ}}^T$  — содержание общей серы в топливе, пересчитанное на золу топлива, %;
- $S_{\text{общ}}$  — содержание общей серы в сухой массе топлива, %;
- $S_{\text{общ}}^{\text{ун}}$  — содержание общей серы в летучей золе, %;
- $S_{\text{общ}}^{\text{ш}}$  — содержание общей серы в шлаке, %;
- $S_{\text{общ}}^{\text{б}}$  — содержание общей серы в золе из бункера поворотной камеры между пароперегревателем и экономайзером, %;
- $A^c$  — зольность сухой массы топлива, %;
- $a_{\text{ун}}$  — весовая доля летучей золы от общего количества золы в газах за экономайзером.

Уравнение (3) составлено из предположения, что доля золы, выпадавшая в бункер поворотной камеры между пароперегревателем и экономайзером, равна  $a_{\text{б}} = 0,03$  (по опытам ОРГРЭС  $a_{\text{б}} = 0,02-0,03$ ).

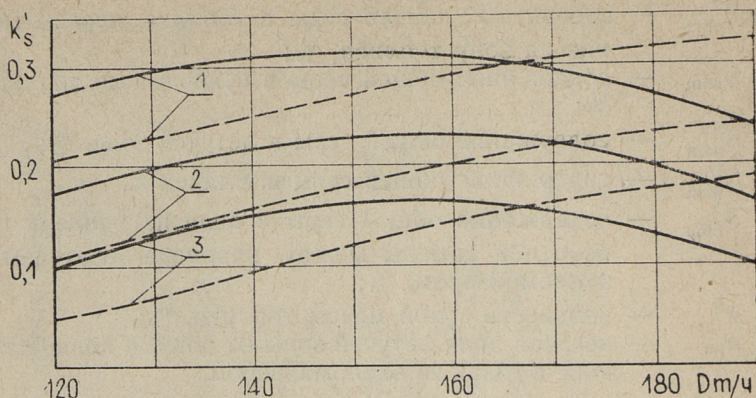
Для приближенного исследования золотого баланса котла ТП-17 в зависимости от паропроизводительности котла был составлен материальный баланс  $\text{SiO}_2$ . Количество  $\text{SiO}_2$  в сухой массе топлива, в летучей золе, в золе поворотной камеры и в шлаке, полученные на основании анализа соответствующих проб, приведены в таблице 2. Из уравнения материального баланса

$$\text{SiO}_2 \frac{100}{A^c} = a_{\text{ун}} \text{SiO}_2^{\text{ун}} + (0,97 - a_{\text{ун}}) \text{SiO}_2^{\text{ш}} + 0,03 \text{SiO}_2^{\text{б}}$$

была определена величина  $a_{\text{ун}}$ . Результаты расчетов  $a_{\text{ун}}$  приведены также в таблице 2. На основе этих данных состав-



Фиг. 3. Зависимость  $a_{\text{ун}}$  от паропроизводительности котла, рассчитанная по балансу  $\text{SiO}_2$



Фиг. 4. Зависимость степени улетучивания общей серы от паропроизводительности котла:

$$\begin{aligned}
 &1 - S_{\text{общ}}^T = 3,84\%, \quad 2 - S_{\text{общ}}^T = 2,73-2,81\%, \quad 3 - S_{\text{общ}}^T = 2,30\% \\
 &\quad \quad \quad a_{\text{ун}} \text{ определен на основании кривой на фиг. 3} \\
 &\quad \quad \quad \text{---} \quad a_{\text{ун}} = 0,67
 \end{aligned}$$

лена зависимость  $a_{\text{ун}}$  от паропроизводительности котла (фиг. 3). Из этой фигуры видно, что  $a_{\text{ун}}$  с увеличением паропроизводительности котла возрастает. При увеличении  $D$  от 125 т/ч до 185 т/ч  $a_{\text{ун}}$  увеличивается соответственно от 0,6 до 0,75. По данным ОРГРЭС'а доля золы, выпадающая в холодную воронку при нагрузке котла 180—210 т/ч, равна 0,27—0,31, что согласуется с настоящими данными.

На основе зависимости, приведенной на фиг. 3, рассчитана степень улетучивания общей серы. Результаты расчета приведены в таблице 2. Там же приведены значения  $K'_s$ , полученные при  $a_{\text{ун}} = 0,67$ . Из этих данных выясняется, что при данных условиях опытов степень улетучивания общей серы не превышает 0,31.

Учитывая зависимость содержания общей серы в золовых остатках от содержания серы в топливе и от паропроизводительности котла, построены кривые зависимости  $K'_s$  от  $D$  и  $S_{\text{общ}}^T$  (фиг. 4). Сплошная кривая получена с учетом зависимости  $a_{\text{ун}}$  от паропроизводительности котла, а пунктирная кривая при  $a_{\text{ун}} = 0,67$ . Из этих данных видно, что при увеличении  $a_{\text{ун}}$  с паропроизводительностью котла  $K'_s$  имеет максимум; при  $a_{\text{ун}} = \text{const}$ ,  $K'_s$  с увеличением паропроизводительности котла непрерывно увеличивается. Также выясняется, что при данном  $a_{\text{ун}}$  снижение серы в топливе сопровождается уменьшением  $K'_s$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. Б. К. Торпан. О химическом и минералогическом составе пластов и пропластов кукерсита. Труды ТПИ, серия А, № 57, 1954.
2. Н. Л. Дилакторский. К вопросу о процессах минералообразования, протекающих при нагревании сланцевой золы и твердений гидратированных продуктов обжига. Сборник трудов «Сланцезольные материалы в строительстве». Эстгосиздат, 1955.
3. Г. К. Саар. Определение состава эстонского сланца-кукерсита и количества образующейся золы по данным промышленного анализа. Труды ТПИ, серия А, № 205, 1963.
4. И. П. Эпик. Влияние минеральной части сланцев на условия работы котлоагрегата. Эстгосиздат, 1961.



УДК 662. 67:662. 87:539. 56. 001. 5

*Л. М. Блүснуу***ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИАГРАММЫ КОЛМОГОРОВА —  
ФАЙ — ЖЕЛЕВА ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ НЕКОТОРЫХ  
РАССЕВОВ ЭСТОНСКИХ ГОРЮЧИХ СЛАНЦЕВ**

Возможности и результаты применения теории Розина — Раммлера — Беннета, широко распространенной во всем мире, не удовлетворяют всем надобностям подробного исследования свойств зернового состава эстонских горючих сланцев. Для более полного и более наглядного познания свойств продуктов измельчения пригодна новая диаграммная техника на логарифмически-нормальной сетке, которая ниже описана и использована.

**Математические основы**

Математическое обоснование логарифмически-нормального распределения размеров частиц дисперсного материала, диаграммы Колмогорова — Фай — Желева (КФЖ) и графических приемов ее использования, а также сравнение теории с данными практики изложены в [1, 2 и 3]. Ниже кратко освещаются некоторые наиболее важные математические выводы этих авторов.

Если вероятность, что после разового дробления частицы с начальным размером  $x$  диаметр любой выбранной полученной частицы попадает в промежуток между  $\alpha x$  и  $(\alpha + d\alpha)x$ , где  $0 \leq \alpha \leq 1$ , не зависит от  $x$  и от того, которому по счету дроблению подвергается частица, тогда после некоторого большого числа единичных дроблений можно функцию счетного распределения выразить соотношением

$$N(x) = \Phi\left(\frac{\ln x - \ln a}{b}\right), \quad (1)$$

где 
$$\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z e^{-\frac{t^2}{2}} dt$$

функция Гаусса и  $a, b$  — параметры. Из функции счетного распределения частиц по размерам  $N(x)$  можно вывести функции поверхностного и весового (объемного) распределения, а также прочие характеристические величины дисперсного материала. Функция поверхностного распределения или распределения поверхности дисперсного материала

$$F(x) = \Phi\left(\frac{\ln x - \ln a - 2b^2}{b}\right) \quad (2)$$

и функция весового распределения

$$S(x) = 1 - 0,01 R_x = \Phi\left(\frac{\ln x - \ln a - 3b^2}{b}\right) \quad (3)$$

где  $R_x$  — доля частиц с диаметром  $> x$  или доля полного остатка на сите  $x$  в процентах.

Если ввести обозначения

$$\begin{aligned} d_S &= ae^{3b^2} & d_N &= a \\ d_F &= ae^{2b^2} & m &= \frac{1}{b}, \end{aligned}$$

то можно функции  $N(x)$ ,  $F(x)$  и  $S(x)$  привести к единой форме

$$y = \Phi\left[\ln\left(\frac{x}{d}\right)^m\right] = \Psi\left[\left(\frac{x}{d}\right)^m\right] = \Psi(\omega), \quad (4)$$

где

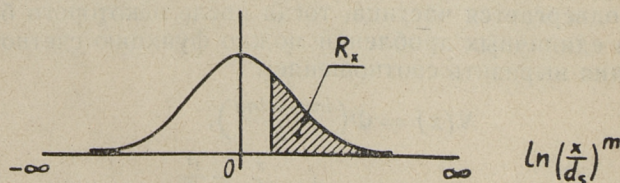
$$\Psi(\omega) = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{2\pi}}} \int_{-\infty}^{\ln \omega - \frac{t^2}{2}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt.$$

Подставляя в формулу (4) вместо  $d$ ,  $d_N$ ,  $d_F$  или  $d_S$ , получаем соответственно формулы (1), (2) или (3).

Из формул (3) и (4) получается

$$R_x = 100 \left\{ 1 - \Phi\left[\ln\left(\frac{x}{d_S}\right)^m\right] \right\},$$

или  $R_x$  равна заштрихованной поверхности на фиг. 1.



Фиг. 1. Кривая Гаусса



Из формулы (4)  $\ln \Psi^{-1}(y) = m \ln \frac{x}{d} = m(\ln x - \ln d)$  и введением переменных

$$\eta = \ln \Psi^{-1}(y), \quad \zeta = \ln x \quad \text{и} \quad \delta = \ln d,$$

получаем линейную функцию

$$\eta = m(\zeta - \delta).$$

Следовательно, функции  $S(x)$ ,  $F(x)$  и  $N(x)$  изображаются на координатной сетке  $\eta$ ,  $\zeta$ , т. е. на логарифмически-нормальной координатной сетке, параллельными прямыми линиями. Тангенс угла наклона прямых к оси  $\zeta$  (к оси  $x$ )

$$m = \frac{\Phi^{-1}(1 - 0,01R_2) - \Phi^{-1}(1 - 0,01R_1)}{\ln x_2 - \ln x_1} \quad (5)$$

является показателем равномерности данного дисперсного материала (или т. н. «показателем, коэффициентом полидисперсности»).

Например для  $S(x)$  на фиг. 2 с помощью табличных значений  $\Phi$

$$m = \frac{\Phi^{-1}(0,945) - \Phi^{-1}(0,795)}{\ln 200 - \ln 90} = \frac{1,60 - 0,825}{5,298 - 4,499} = 0,97.$$

Здесь  $\Phi^{-1}(1 - 0,01R) = c$ , где  $\Phi(c) = 1 - 0,01R$ .

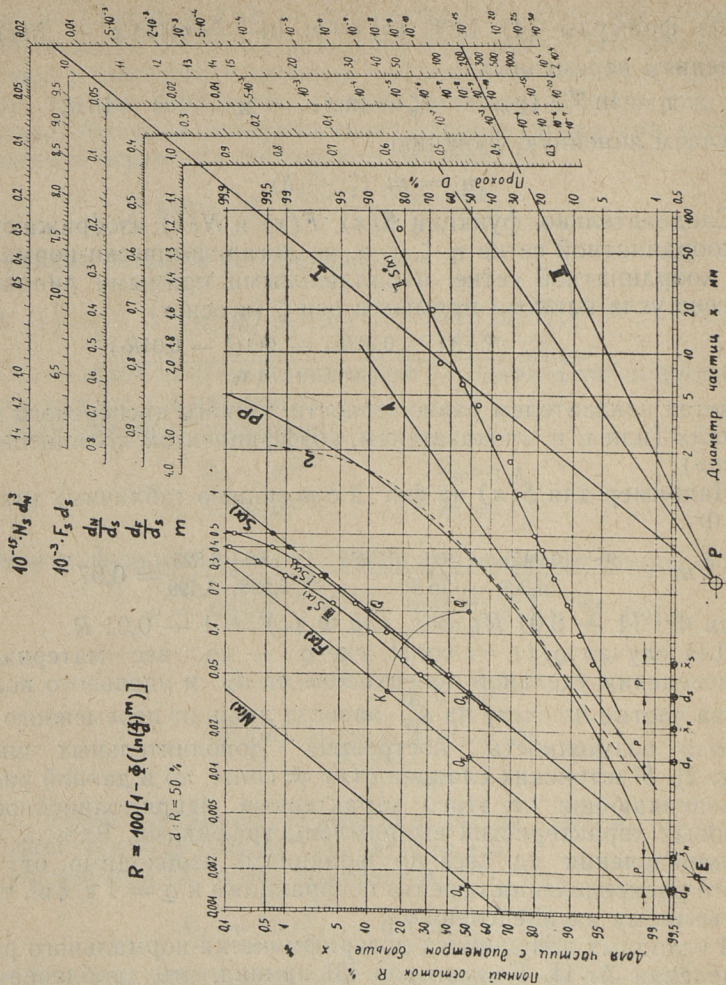
Для случая  $\rho(x) = \text{const}$ , где  $\rho$  — уд. вес материала, произведения удельной поверхности на  $d_S$  и удельного количества частиц по счету на  $d_N^3$  зависят лишь от переменного  $m$ . Отсюда возможность построения дополнительных шкал (фиг. 2). У эстонских сланцев  $\rho(x) \neq \text{const}$ , но в данной работе возникающие от этого характерные непрямолинейности зерновых характеристик выпрямлены графиками. Впредь, после определения уд. веса по фракциям, необходимо от весового распределения перейти по фракциям к  $\rho = 1 \text{ г/см}^3$ , т. е. к объемному распределению.

В исходных допущениях логарифмически-нормального распределения А. Н. Колмогоров [3] принял, что дробление не зависит от начального размера  $x$ . Но как известно, с уменьшением размеров частиц происходит упрочнение последних. Предполагаем, что из-за небольшого интервала размеров частиц теплоэнергетической пыли упрочнение частиц не причиняет заметных неточностей.

### Приемы использования диаграммы КФЖ [2]

Графики весового распределения дисперсных материалов, которые являются вследствие сепарации непрямолинейными с

Фиг. 2. Графические приемы использования диаграммы КФЖ. I  $S^*(x)$  — график весового распределения или зерновая характеристика пыли, продукта размола эстонских сланцев с графиком II  $S^*(x)$  в ШМТ 1300/2564/740. III  $S^*(x)$  — летучая зола сланцев. РР — пример зерновой характеристики, прямолнейной на диаграмме РРБ. I — зерновая характеристика перед сепаратором и 2 — после сепаратора (примеры)



более или менее вверх согнутыми верхними концами, обрабатываются на диаграмме КФЖ фиг. 2 превращенными в идеальные дисперсные материалы с прямолинейными графиками распределения. Диаграмма КФЖ взята из [4].

1. Значения полных остатков пробы 1 из табл. 1  $R_{x_1}^*$ ,  $R_{x_2}^*$ ...  $R_{x_n}^*$  наносим на диаграмму фиг. 2 и обозначим построенный график весового распределения действительного продукта размола через  $S^*(x)$ .

2. Методом постановки или графическим путем найдем такое значение коэффициента превращения  $\lambda_S$  между 0 и 1, чтобы после умножения  $\lambda_S \cdot D_{x_1}^*$ ,  $\lambda_S \cdot D_{x_2}^*$  и т. д. точки  $[x_1; \lambda_S \cdot D_{x_1}^*]$ ,  $[x_2; \lambda_S \cdot D_{x_2}^*]$ ,  $[x_3; \lambda_S \cdot D_{x_3}^*]$  и т. д.

на диаграмме КФЖ были бы на одной и той же прямой  $S(x)$ , то есть на прямой весового распределения идеального дисперсного материала. Проход  $D_{x_1} = 100 - R_{x_1}$ .

Для построения  $S(x)$  нужно взять не менее трех остатков. Целесообразно отметить, что графики  $S(x)$  и  $S^*(x)$  необходимо построить на основе больших остатков, потому что в вероятностной сетке точки, лежащие далеко

Таблица 1

Средние значения ситового анализа проб сланцев и золы

№ пробы		I	II	III
Материал		пыль	топливо	зола
№ порядковый	Сторона ячейки сетки, мм	Полный остаток на сите $R_{x_i}^*$ %		
1	8,5		35,2	
2	5,95		46,2	
3	4,25		53,9	
4	2,55		63,8	
5	1,7		69,3	
6	1,0	0,012	73,6	
7	0,5	0,149	79,3	
8	0,4	0,631	82,1	0,125
9	0,315	1,44	84,0	0,374
10	0,250	3,04	85,7	1,04
11	0,160	7,78	89,3	4,40
12	0,100	15,03	91,7	10,76
13	0,063	31,25	94,1	20,58
14	0,050	40,25	95,4	27,10
15	0,030	56,41	—	—
16	0,000	100,00	100,0	100,00

Таблица к диаграмме КФЖ (фиг. 2)

№ пп	Наименование	Обозначение	Размерность	Пробы (сит. анализ в табл. 1)		
				пыль I	топливо II	зола III
1	Удельный вес куска материала <sup>1</sup>	$\rho$	г/см <sup>3</sup>	1,68	1,68	2,73
2	Коэффициент превращения	$\lambda_S$	—	0,995	1	0,99
3	Тангенс угла наклона прямых (показатель равномерности)	$\frac{m}{x_N}$	—	0,97	0,37	0,894
4	Средний диаметр счетный	$x_F$	мкм	2,7	—	1,2
5	” поверхностный	$x_S$	”	22	120	14
6	” весовой	$d_N$	”	74	170 000	50
7	Медианный диаметр счетный	$d_F$	”	1,6	—	0,66
8	” поверхностный	$d_S$	”	13	3,2	7,8
9	” весовой	$F_S d_S$	”	38	4600	27
10	$F_S d_S$ по дополнительной шкале	$\lambda_F$	—	10,2	220	11,15
11	Коэффициент превращения	$F_S^*$	—	1	1	1
12	Теоретическая поверхность (шары)	$k$	м <sup>2</sup> /кг	161	28,5	153
13	Коэффициент формы (по $d_F$ для известняка, фиг. 3)	$k$	—	1,4	1,25	1,3
14	Удельная поверхность $F = k \cdot F_S^*$	$F$	м <sup>2</sup> /кг	225	35,6	199
15	$N_S d_N^*$ по дополнительной шкале	$N_S d_N^*$	—	0,015	10 <sup>-14</sup>	0,0072
16	Количество частиц	$\frac{N_S}{S}$	шт./кг	2,2 · 10 <sup>12</sup>	—	9,2 · 10 <sup>12</sup>
17	Средний вес частиц	$\frac{m}{S}$	мг	4,55 · 10 <sup>-7</sup>	—	1,09 · 10 <sup>-7</sup>
18	Средняя поверхность частиц	$\frac{F}{m}$	мкм <sup>2</sup>	102	—	21,6

19	Для про- верки	По данным из координатной сетки	$d_N/d_S$	—	0,042	—	0,0244
20			$d_N/d_S$ на дополнительной шкале	0,042	—	$3,5 \cdot 10^{-10}$	0,0240
21		По данным из координатной сетки	$d_F/d_S$	—	0,342	—	0,289
22			$d_F/d_S$ на дополнительной шкале	0,342	—	0,0007	0,287
23		Параметр $v$ на фиг. 4 по $R_{88}$ и $R_{200}$	$v$	—	0,04	—	0,04
24		Теоретическая поверхность по фиг. 4	$F_S$	—	161	—	88
				$m^2/kg$			28,6

<sup>1</sup> Удельный вес сланца 1,68 взята из [12] и удельный вес летучей золы пробы III принята равным уд. весу циклонной золы такой же тонкости из [10].

от медианлинии  $R_x = 50\%$ , имеют малый статический вес, так как отвечают небольшому числу частиц. Желательно было бы построить графики весового распределения примерно по следующим остаткам: 90, 50 и 10% [5] или 90, 70, 50 и 30%.

3. Для построения прямой поверхностного распределения  $F(x)$  найдем на прямой весового распределения  $S(x)$  точку  $Q$  (см. фиг. 2) с ординатом  $R_x = 10\%$ . Точку  $Q$  спроектируем на медианлинию и обозначим через  $Q'$ . Вокруг медианточки  $O_S$ , принадлежащей прямой  $S(x)$ , проведем дугу через точку  $Q'$  до пересечения в верхней части диаграммы с вертикальной линией через  $O_S$ . Через точку пересечения  $K$  проходит  $F(x)$  параллельно к  $S(x)$ .

4. Для построения прямой счетного распределения  $N(x)$  необходимо на медианлинии влево от  $O_F$  найти точку  $O_N$  так, чтобы расстояние  $O_F O_N = 2 \cdot O_F O_S = 2p$  и тогда через точку  $O_N$  провести параллель к  $S(x)$ .

5. Средним счетным диаметром  $\bar{x}_N$ , средним поверхностным диаметром  $\bar{x}_F$  и средним весовым диаметром  $\bar{x}_S$  частиц являются абсциссы точек, удаленных от точек  $O_N$ ,  $O_F$  и  $O_S$  на расстояние  $O_S O_F : 2 = 0,5p$  вправо по медианлинии. Все величины записаны в табл. 2.

6. Абсциссы медианточек  $O_N$ ,  $O_F$  и  $O_S$  являются соответственно счетным, поверхностным и весовым медианным диаметром  $d_N$ ,  $d_F$  и  $d_S$ .

7. Для нахождения удельной поверхности дисперсного материала (на диаграмме поверхность рассчитана для частиц шарообразной формы) следует провести стрелку из полюса  $P$  параллельно к  $S(x)$  через все добавочные шкалы диаграммы.

Значение точки пересечения на добавочной шкале  $F_S d_S$  делим на  $d_S$  в микронах, на уд. вес куска размалываемого материала  $\rho$  в  $г/см^3$  и умножаем на 1000

$$F_S = \frac{F_S d_S \cdot 10^3}{d_S \cdot \rho} \text{ м}^2/\text{кг}.$$

$F_S$  удельная поверхность идеального дисперсного материала. Для получения удельной поверхности  $F_S^*$  действительного дисперсного материала необходимо сначала найти на шкале  $D_x$  ординату  $\lambda_F \cdot 100$  такой точки прямой  $F(x)$ , которая имеет такую же абсциссу как точка прямой  $S(x)$  с ординатом  $\lambda_S \cdot 100$  (на шкале проходов  $D_x$ ). Теперь

$$F_S^* = \frac{F_S \cdot \lambda_F}{\lambda_S} \text{ м}^2/\text{кг}.$$

8. Общее счетное количество частиц в единице веса дисперсного материала

$$N_S = \frac{N_S d_N^3 \cdot 10^{15}}{\lambda_S \cdot \rho \cdot d_N^3} \text{ штук/кг},$$

где  $N_S d_N^3$  — значение на добавочной шкале;

$\rho$  — уд. вес куска размолотого материала, в  $г/см^3$ ;

9. Средний вес частиц  $\bar{s} = \frac{1}{N_S}$ .

Средняя поверхность частиц  $\bar{f} = \frac{F_S^*}{N_S}$ .

10. На остальных добавочных шкалах стрелка из полюса показывает:

$m = \text{tg} \beta$  — тангенс угла наклона прямых распределения к оси абсцисс;  $m$  имеет подобное же значение как  $n$  на диаграмме Розина — Рамллера — Беннета (РРБ) [6];

$\frac{p_F}{d_S}$  и  $\frac{d_N}{d_S}$  — соотношения медианных диаметров.

Считаем, что последними двумя соотношениями можно пользоваться для проверки правильности графического построения прямых  $F(x)$  и  $N(x)$ , исходя из  $S(x)$  и  $d_s$ . Можно поступить и наоборот, то есть, исходя из прямой  $S(x)$ ,  $d_s$  и последних двух соотношений, построить прямые  $F(x)$  и  $N(x)$ , а проверку сделать в пунктах 3 и 4 описанным методом построения.

11. Весовое и поверхностное распределение действительного дисперсного материала вычислим делением ординат прямых  $S(x)$  на  $\lambda_S$  и  $F(x)$  на  $\lambda_S$ .

График весового (объемного) распределения или так называемая зерновая характеристика дает отношение общего веса частиц с диаметром  $> x$  к общему весу дисперсного материала.

График поверхностного распределения дает отношение суммарной поверхности частиц с диаметром  $> x$  к общей поверхности всего дисперсного материала.

График счетного распределения дает отношение количества частиц с диаметром  $> x$  к общему счетному количеству частиц.

12. Понятия различных средних диаметров частиц [7]:

$\bar{x}_N$  — средний счетный или арифметический средний диаметр

$$\bar{x}_N \approx \sum_i \frac{x_i N_i}{N},$$

где  $N_i$  — число частиц в  $i$ -ом интервале;

$x_i$  — середина этого интервала;

$N$  — общее число частиц;

$x_F$  — средний поверхностный или средний квадратичный диаметр

$$\bar{x}_F \approx \left[ \sum_i \frac{x_i^2 N_i}{N} \right]^{\frac{1}{2}};$$

$\bar{x}_S$  — средний весовой, средний по объему или средний кубический диаметр

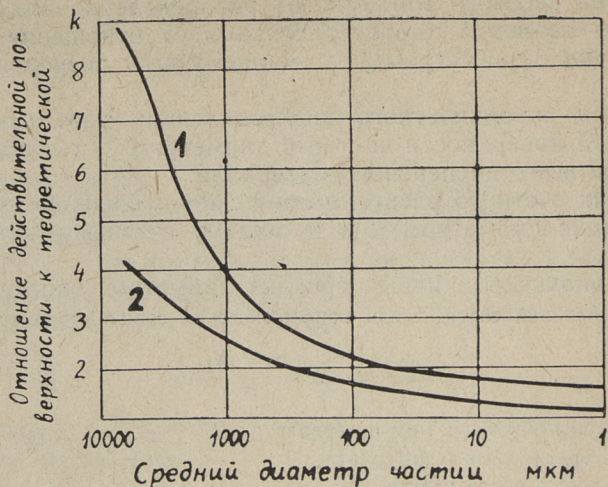
$$\bar{x}_S \approx \left[ \sum_i \frac{x_i^3 N_i}{N} \right]^{\frac{1}{3}};$$

— счетный медианный диаметр или медиана счетного распределения означает, что половина по счету частиц имеет диаметр  $> d_N$  и половина  $< d_N$ ;

— медианный диаметр по поверхности означает, что суммарная поверхность всех частиц с диаметром  $> d_F$  составляет половину всей поверхности дисперсного материала;

$d_S$  — весовой медианный диаметр означает, что вес частиц с диаметром  $> d_S$  составляет половину всего веса дисперсного материала.

Посредством диаграммы КФЖ получаем суммарную поверхность частиц шарообразной формы или идеализированную поверхность, которая для определения действительно обнаженной поверхности должна быть исправлена умножением на коэффициент формы  $k$ . Этот коэффициент больше единицы, так как шар имеет максимальный объем при минимальной поверхности. Методом подсчета скорости растворения порошка выведены приведенные на фиг. 3 значения  $k$  для известняка



Фиг. 3. Коэффициент формы  $k$ : 1 — кварц; 2 — известняк

и кварца [8]. В. П. Ромадин предлагает  $k$  для угольной пыли принимать равным 1,6 . . 2, в среднем 1,75 [8].

На диаграмме поверхностей фиг. 4 Г. Фай и Б. Желев [2] изображают зависимость удельной поверхности  $F_s$  идеального дисперсного материала от  $R_{88}$  и  $R_{200}$

$$F_s = v \cdot \frac{6}{\rho} \cdot 10^3 \text{ м}^2/\text{кг},$$

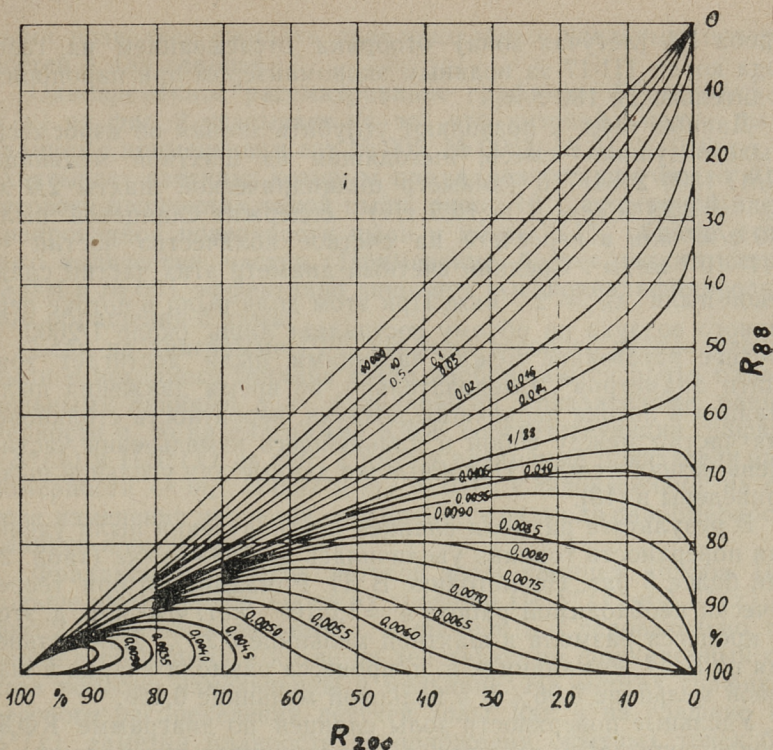
где  $v$  — значение параметра на диаграмме поверхностей в пересечении линии  $R_{88}$  и  $R_{200}$  на фиг. 4.

Диаграмму поверхностей можно использовать для оперативного нахождения идеализированной поверхности дисперсного материала и для проверки результатов по диаграмме КФЖ (см. табл. 2).

### Исследование некоторых рассевов сланца и золы

В данной работе не принимаются во внимание характерные для эстонских сланцев непрямолинейности отдельных участков графика  $S^*(x)$ . Такие непрямолинейности графика, видимо, обусловлены тем, что различные по уд. весу составные части сланца-кукерсита, т. е. карбонатная часть, песчано-глинистая (терригенная) часть и органическая часть имеют различные размольные свойства [9]. Изменение уд. веса по фракциям, вызванное различием размольных свойств составных частей и условиями сепарации, здесь не рассматривается.





Фиг. 4. Диаграмма поверхностей. Удельная поверхность  
 $F_s = v \cdot 6 \cdot q^{-1} \cdot 10^3$ .

Вышеописанным методом на фиг. 2 графически обработаны данные ситовых анализов пыли сланцев, сланцев открытой добычи и летучей золы сланцев, т. е. проб I, II и III в табл. 1. Результаты графической обработки приведены в табл. 2.

Проба 1 пыли сланцев взята из отводов за цилиндрической шахтой шахтной мельницы типа ШМТ 1300/2564/740 с 75 билами. Работа мельницы характеризовалась следующими данными:  $\bar{\omega}_{ш} = 2,28$  м/сек,  $V = 16,5$  т/ч и  $\mathcal{E}_{общ} = 7,20$  квт. ч/т. В пробе пыли содержание  $A^c = 49,8\%$ ,  $(CO_2)_K^c = 24,1\%$  и  $W^{пл} = 0,4\%$ . Проба 1 выбрана из большого количества проб как наиболее характерная.

Во время отбора пыли для пробы 1 в мельницах котла размалывалось топливо с  $A^c = 49,6\%$ ,  $(CO_2)_K^c = 23,6\%$ ,  $W^p = 9,7\%$  и  $Q_p^p = 1936$  ккал/кг. Проба для ситового анализа (проба II) взята в то же время из нижней части бункера мельницы.

Проба III (летучая зола) отобрана отсасыванием из газохода котла ТП-17 за водяным экономайзером при паропроизводительности 180 т/ч.

Данные табл. 2 позволяют углубить знания об аэросмеси. Пылевоздушная смесь, выходящая из шахтной мельницы ШМТ 1300/2564/740 (диаметр цилиндрической шахты 2,0 м,  $w_{\text{ш}} = 2,28$  м/сек,  $B = 16,5$  т/ч) содержит сланцевой пыли 640 г/м<sup>3</sup> или в пересчете на счетное количество частиц —  $1,41 \cdot 10^{12}$  шт/м<sup>3</sup>. Средний счетный диаметр этих частиц сланцевой пыли  $\bar{x}_N = 2,7$  мкм. При этом доля пыли в потоке первичного воздуха по объему составляет лишь около 1/2600, а среднее расстояние между частицами пыли достигает тридцати диаметров\*. Следовательно, во время движения пыли сланцев в потоке первичного воздуха, вероятность столкновения частиц между собой и дальнейшего измельчения частиц очень незначительна. Подобные же данные для угольной пыли приведены в [13].

В результате размола сланцев при получении пыли удельная поверхность топлива увеличилась на 189,4 м<sup>2</sup>/кг (табл. 2) или более 5 раз. По методике В. П. Ромадина [8] при теоретически необходимой работе  $\delta = 1,0 \cdot 10^{-7}$  квт. ч/м<sup>2</sup> к. п. д. этого процесса размола в шахтной мельнице 0,26%. Для сравнения по В. П. Ромадину к. п. д. процесса размола кварца в шаровой мельнице 0,06% и в валковой мельнице 0,4%.

Удельные поверхности золы сланцев по диаграмме КФЖ удовлетворительно сходятся с экспериментальными данными пневматического поверхностемера. Например, циклонная зола Кохтла-Ярвской теплоэлектростанции имеет полные остатки  $R_{90} = 14,8\%$ ,  $R_{60} = 23,6\%$ ,  $R_{30} = 45,5\%$ , уд. вес  $\rho = 2,73$  г/см<sup>3</sup> и удельную поверхность 160 м<sup>2</sup>/кг [10]. По диаграмме КФЖ  $F_s = 154,6$  м<sup>2</sup>/кг. Отсюда коэффициент формы  $k = 160:154,6 = 1,035$ , что конечно очень малое значение, но во всяком случае указывает на шарообразность формы основного количества частиц. Крупная и мелкая фракции этой же золы имеют следующие данные [10]:

1.  $R_{90} = 35,5\%$ ,  $R_{60} = 50,3\%$ ,  $R_{30} = 79,7\%$ ,  $\rho = 2,80$  г/см<sup>3</sup>;
2.  $R_{90} = 2,3\%$ ,  $R_{60} = 4,6\%$ ,  $R_{30} = 18\%$ ,  $\rho = 2,67$  г/см<sup>3</sup>.

Для крупной фракции по пневматическому поверхностемеру уд. пов. 68 м<sup>2</sup>/кг, по диаграмме КФЖ  $F_s = 54,1$  м<sup>2</sup>/кг и  $k = 1,26$ , но для мелкой фракции соответственно 208 м<sup>2</sup>/кг,  $F_s = 247$  м<sup>2</sup>/кг и  $k = 0,84$ (?) (график через точки  $R_{60}$  и  $R_{30}$ ).

Приведенное сравнительно хорошее совпадение удельных поверхностей по диаграмме КФЖ с экспериментальными дан-

\* Все данные отнесены к температуре воздуха 0°C.

ными позволяет ожидать правдоподобных удельных поверхностей и для сланцев.

Одновременное рассматривание графиков  $S(x)$ ,  $F(x)$  и  $N(x)$  на фиг. 2 указывает на то, что ситовой анализ пыли сланцев с применением сит № 005, № 0063, № 01, № 016 и т. д. охватывает частицы, которым принадлежит лишь около 40% весового количества такой пыли, около 10% суммарной идеализированной поверхности пыли и менее 0,1% общего счетного количества частиц. Применение более мелких сеток, № 004 и № 003, эффективно лишь при высококвалифицированном обращении с ними.

Если на диаграмме РРБ графики весового распределения пыли и исходного топлива часто изображаются почти параллельными линиями, т. е. одинаковыми показателями равномерности  $n$ , то на диаграмме КФЖ соответствующие графики I  $S^*(x)$  и II  $S^*(x)$  на фиг. 2 имеют различные показатели равномерности —  $m_I = 0,97$  и  $m_{II} = 0,37$ . Следовательно, на основе изменения значения  $m$ , в процессе размола равномерность сланцев повышается.

Фракционный состав летучей золы сланцев (проба III) тоньше пыли (проба I), но их графики III  $S^*(x)$  и I  $S^*(x)$  на фиг. 2 почти параллельные, т. е.  $m_I \approx m_{III}$ . Следовательно, горение и сепарация в котле не действуют на фракционный состав подобно измельчению в мельнице. На многих графиках весового распределения летучей золы, как и на графике III  $S^*(x)$ , заметна плавность расположения опытных точек без каких-либо характерных отклонений. Графики весового распределения пыли сланцев менее плавные и имеют характерные искривления.

Показатель равномерности дисперсного материала  $m$  на диаграмме КФЖ имеет подобное же значение как показатель равномерности  $n$  на диаграмме РРБ, но при одинаковых значениях остатков  $R$   $m \neq n$ . Прямая зерновая характеристика на диаграмме РРБ, например, значением  $n = 0,895$  дает на диаграмме КФЖ непрямолинейный график (РР на фиг. 2 вверх согнутым концом или заметными следами сепарации). У такого графика РР не может быть единого значения  $m$ , но идеальный состав (до сепарации) этого дисперсного материала, полученный с помощью коэффициента превращения  $\lambda_S = 0,7$ , имеет  $m = 0,52$ . К. Шефф [5] тоже указывает на возможность превращения графика РР на логарифмически-нормальной сетке в прямую зерновую характеристику, которую имел сепарированный дисперсный материал РР до сепарации.

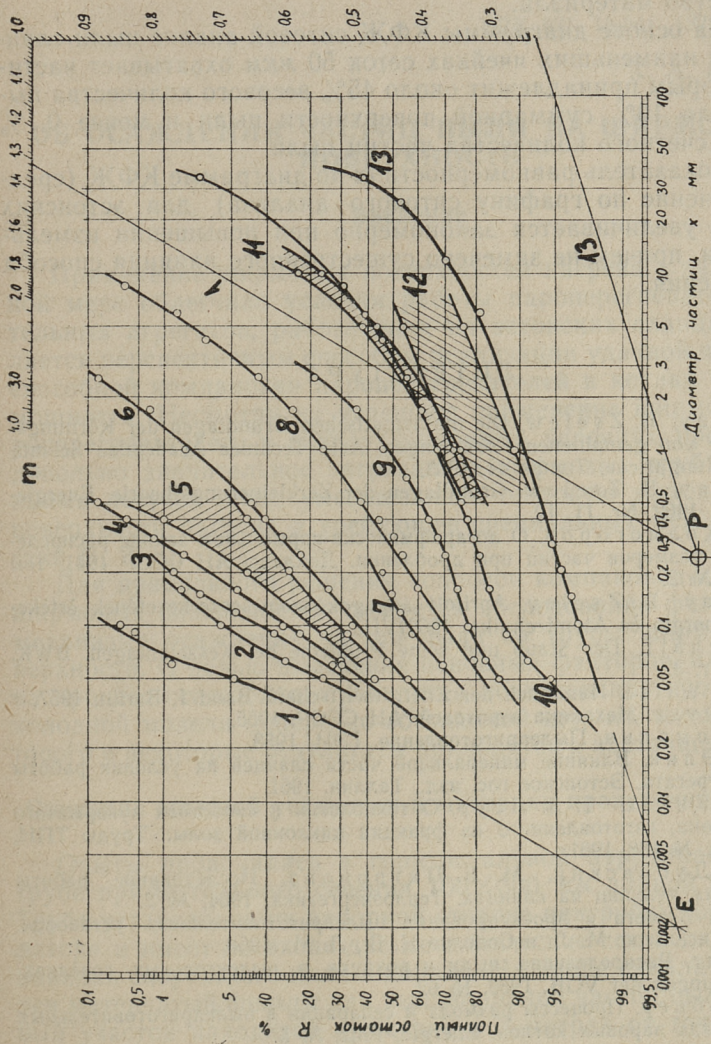
Приведенные на фиг. 2 и 5 12 графиков весового распределения и 3 диапазона зернового состава эстонских горючих сланцев различной дисперсности и полученные самыми раз-

нообразными методами измельчения достаточно четко изображают на логарифмически-нормальной сетке пучок линий, которые все как-будто исходят из области точки  $E$  с координатами  $R = 99,8\%$  и  $x = 0,002$  мм. Описанное свойство эстонских горючих сланцев показывает, что при измельчении или повышении тонкости помола основное (среднее) значение показателя равномерности  $m$  зерновой характеристики увеличивается. Крайними значениями показателя равномерности получены  $m_{\min} = 0,24$  и  $m_{\max} = 1,31$ . Увеличение значения  $m$  при размоле можно объяснить предположением, что частицы меньшего малого размера по каким-либо причинам, может быть из-за действия потоков воздуха, минимально участвуют в процессе размолы и преимущественно измельчаются более крупные куски. Вышесказанное в соответствии с упрочнением частиц при уменьшении их размеров и указывает на несоответствие параметров и конструктивных показателей примененных измельчителей для более тонкого размолы.

Ф. Хюбнер [14] тоже указывает на возможность поворачивания графика весового распределения вокруг определенной точки, хотя бы в данном случае на диаграмме РРБ, но это встречается лишь тогда, когда процесс размолы продлится очень долго. Однако этот случай в практике размолы углей не встречается. В основном показатель равномерности для германских бурых углей зависит в первую очередь от вида топлива и несущественно от способа размельчения. Аналогично ведут себя и каменные угли.

Несущественность влияния способов измельчения на показатель равномерности сланцев заметна и на фиг. 5. На диаграмме рядом приведены графики весового распределения продуктов размолы или измельчения очень разнообразных способов: продуваемая лабораторная шаровая мельница 40-МЛ; ШБМ 280/600 с инерционным сепаратором; непродуваемая промышленная ШБМ тонкого размолы; ШМТ 1300/2564/740 с прямоугольной шахтой, с цилиндрической шахтой и то же с инерционным сепаратором; дробилка ЛДМ-1А мехопробователя; ручное измельчение и дробилка Блека. Несмотря на все это разнообразие способов измельчения основное значение показателя равномерности  $m$  зависит как-будто только от степени тонкости измельчения.

При сланцах о пересечении графиков весового распределения говорить еще рано, из-за неисследованности этих графиков в области малых частиц. В действительности частицы с размером от 2 до 0,05 мкм существуют в пыли сланцев и реально должны быть еще более мелкие частицы, но их весовое количество пока не определено.



Фиг. 5. Пересечение направлений зерновых характеристик эстонских сланцев около точки Е:

1 — лабораторная ШБМ 40-МЛ с инерционным сепаратором, двумя циклонами и электрофильтром, 2 — ШБМ 280/600 с инерционным сепаратором, В  $\approx 20$  т/ч, 3 — непродуваемая ШБМ, В  $\approx 8$  т/ч [9], 4 — ШМТ 1300/2564/740 с прямоугольной шахтой, 5 — ШМТ 1300/2564/740 с инерционным сепаратором, 7 — непродуваемая ШБМ, В  $\approx 8$  т/ч [9], 8 — дробилка ЛДМ-1А мехпробователя, 9 — ручное измельчение, 10 — от транспортной ленты Прибалтийской ГРЭС, 11 — сланец 3-го сорта [11], 12 — топливо Прибалтийской ГРЭС [11], 13 — дробилка Блека [9]

## Выводы

1. Использование специальных логарифмических сеток при исследовании зернового состава дисперсных материалов позволяет подробно и наглядно систематизировать большое количество материала.

2. На основе диаграммы КФЖ ситовой анализ пыли сланцев при наименьших ячейках сеток 50 мкм охватывает частицы, которым принадлежит около 45% весового количества пыли, около 10% суммарной поверхности пыли и менее 0,1% общего счетного количества частиц пыли.

3. Показатель равномерности  $m$  по диаграмме КФЖ (среднее значение по графику ситового анализа) для эстонских сланцев увеличивается закономерно при повышении измельченности, причем не замечено существенного влияния способа измельчения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Gy. Fay, B. Zselew. Die mathematischen Grundlagen der Körnungsanalyse von gemahlten Kornmengen. Acta Technica Academiae Scientiarum Hungaricae, Tomus 44, 1963.
2. Gy. Fay, B. Zselew. Grundlagen der Zerkleinerungstheorie. Energietechnik, 1962, Nr. 11, 12.
3. А. Н. Колмогоров. О логарифмически-нормальном законе распределения размеров частиц при дроблении. Доклады АН СССР 1941, том XXXI, № 2.
4. Gy. Fay, B. Zselev. Aprított anyagok szemcseszerkezetének értékelése. Energia és Atomtechnika, 1962/VII.
5. K. Schäff. Der Staub und seine Probleme bei Kesselanlagen. BWK, 1962, Nr. 3.
6. Hans Witte. Handbuch der Energiewirtschaft. Band I, Berlin, 1957.
7. Н. А. Фукс. Механика аэрозолей. АН СССР, 1955.
8. В. П. Ромадин. Пылеприготовление. ГЭИ, 1953.
9. И. П. Эпик. Влияние минеральной части сланцев на условия работы котлоагрегата. Эстонское гос. изд., Таллин, 1961.
10. В. Х. Кикас, Т. А. Лаур. О технологии и свойствах кукурмитого газобетона, изготовленного из фракции циклонной золы. Труды ТПИ, серия А. № 188, 1961.
11. И. Е. Дубовский, М. В. Патронова. Исследование работы бильных мельниц на сланцах. Теплоэнергетика, 1964, № 2.
12. Нормы расчета и проектирования пылеприготовительных установок. Ред. Кисельгоф М. Л. и Соколов Н. В., Л. М., 1958.
13. Р. Юнг. Распределение пыли и воздуха в пылеугольных горелках. Mitteilungen der VGB, 1959, № 62.
14. Ф. Хюбнер. Процессы размола и сепарации в пылеприготовительных установках паровых котлов. Energie, 1962, № 5.

УДК 621. 18:541. 182. 3. 001. 5

*Х. А. Поорайд*

## **ОБ ОСАЖДЕНИИ ЧАСТИЦ ПЫЛИ НА ШИРМОВУЮ ПОВЕРХНОСТЬ**

### **Введение**

Применение ширмовых поверхностей нагрева в значительной мере облегчило условия работы пароперегревателей котельных агрегатов, работающих на эстонских сланцах и является перспективным способом реализации удачной и работоспособной компоновки пароперегревателей в котлах большой мощности. Несмотря на успешное применение ширмовых пароперегревателей, в эксплуатационных условиях происходит довольно значительное загрязнение ширмовых труб отложениями летучей золы, уменьшающее тепловую эффективность поверхности нагрева и требующее специальных мер для очистки [1, 2, 3].

Для правильного решения вопросов компоновки и расчета ширмовых поверхностей требуется исследование физического механизма осаждения частиц пыли на трубы ширмовой поверхности. С целью выяснения основных факторов, влияющих на процесс осаждения, проводится исследование процесса на холодной модели поперечно-обтекаемой ширмы, методика которого и некоторые результаты приводятся в настоящей статье.

### **Описание опытной установки и методика проведения опытов**

Опыты проводились в горизонтальной аэродинамической трубе прямоугольного сечения  $100 \times 300$  мм длиной 3600 мм. Труба установлена на напорной стороне центробежного вентилятора и имеет на входе две металлические сетки для выравнивания скоростного поля в канале. На конце канала установлен матерчатый фильтр для вылавливания частиц пыли. Опытный участок находится примерно в 3 метрах от точки ввода пыли в канал и имеет съемную крышку для установки модели. Изменение скорости потока в канале производится дросселированием на всасывающей стороне вентилятора. Предварительными опытами было установлено, что конструкция канала

обеспечивает равномерное поле скоростей потока в середине на  $2/3$  ширины и высоты канала в диапазоне скоростей от 4,8 до 12,3 м/сек. Измерение скорости потока производилось термоманометром типа ЭТАМ-3А.

Модель ширмовой поверхности была изготовлена из 20 стеклянных труб наружным диаметром 12,4 мм и длиной 95 мм, закрепленных между металлическими корытообразными планками, заполненными наплавленной канифолью для придания модели жесткости. Модель прикреплялась в середине канала ко дну в вертикальном положении труб.

При опытах применялся эмульсионный порошок акриловой смолы АКР-7 с шаровидными частицами плотностью 1190 кг/м<sup>3</sup> и диаметр от 7 до 35 мкм, полученный фракционированием порошка в воздушном сепараторе. Пыль вдувалась в аэродинамический канал через изогнутую стеклянную трубку внутренним диаметром 3 мм, отверстием в направлении потока. Выходное отверстие питателя было выбрано по данным предварительных опытов и обеспечивало равномерное распределение частиц пыли в средней части сечения опытного участка канала.

Предварительными опытами была установлена следующая методика проведения опытов. Покрытая слоем (толщиной 15—20 мкм) чистого вазелина модель, поставленная в аэродинамический канал, продувалась воздушным потоком. Через питатель вводили в поток порцию пыли весом 10—20 мг. После ввода пыли установку останавливали и вынимали из модели первую трубу для подсчета осевших частиц пыли. После подсчета трубу очищали, снова покрывали слоем вазелина, ставили в модель и повторяли пропускание пыли. Таким образом поступали пока визуально не было установлено наличие достаточного количества частиц на последующих трубах модели. Тогда модель была вынута из канала и произведен подсчет частиц на всех трубах ширмы. Такая методика обусловлена требованием, что вероятность попадания частиц пыли из потока на уже осаждавшиеся частицы не превышала 2—3% [4]. При этом осаждение частиц на первую трубу происходило во много раз интенсивнее, чем на последующие трубы.

Подсчет осевших частиц производился под микроскопом по всему периметру трубы на полосе шириной 2—3 мм на высоте 50 мм от дна канала. Площадь, охваченная подсчетом для первой и последующих труб, одинакова. При подсчете производилось измерение диаметра частиц с целью получения на одном скоростном режиме данных для нескольких средних диаметров частиц более узких интервалов.

В опытах не определялась концентрация пыли в воздушном потоке до модели, так как предварительными опытами



было установлено, что осаждение частиц пыли на первую трубу ширмы соответствует осаждению на одиночную трубу. Из имеющихся литературных данных по осаждению пыли на одиночные трубы [4, 5, 6] в основу последующих расчетов были положены экспериментальные данные В. И. Игнатъева и Н. И. Зверева [5]. По этим данным можно определить вероятность удара частиц о трубу как функцию от критерий подобия в виде:

(1)

$$\eta_1 = \frac{N_1}{N_0} = f \left[ Stk^{2,35} \cdot Re_d^{0,65} \cdot Fr^{-1} \cdot (\rho_0/\rho)^{0,15} \right],$$

где  $\eta_1$  — вероятность удара частиц о трубу;  
 $N_0$  — число частиц в потоке до трубы, проходящих проекцию трубы;  
 $N_1$  — число частиц, осевших на трубе;  
 $Stk = w\delta^2\rho_0/18\nu d\rho$  — критерий Стокса;  
 $Re_d = wd/\nu$  — критерий Рейнольдса;  
 $Fr = w^2/dg$  — критерий Фруда;  
 $w$  — скорость потока;  
 $\nu$  — кинематическая вязкость потока;  
 $\rho$  — плотность потока;  
 $\delta$  — диаметр частицы;  
 $\rho_0$  — плотность частицы;  
 $d$  — диаметр трубы;  
 $g$  — ускорение силы тяжести.

Функция (1) дана в работе [5] графиком с нанесенными опытными точками.

С целью проверки применимости результатов опытов В. И. Игнатъева и Н. И. Зверева [5] для определения четной концентрации пыли в потоке до ширмы по микроскопическим подсчетам количества осажженной на первой трубе ширмы пыли, были проведены следующие контрольные опыты:

Опыт № 1. Подсчетом определялся фракционный состав пыли до ввода ее в канал и после осаждения на первую трубу при скорости потока 12,3 м/сек. По данным [5] определили  $\eta_1$  для отдельных фракций и ожидаемое фракционное распределение пыли осажженной на первой трубе. Результаты опыта приведены в табл. 1.

Опыт № 2. Подсчетом определялись фракционные распределения пыли, осажженной на первой трубе при скоростях потока 4,8 и 12,3 м/сек и по данным [5] вероятности удара частиц о трубу при этих условиях. По этим данным расчетным путем определили соответствующие фракционные распределения пыли до осаждения. Так как для обеих скоростей применялась пыль одинакового состава, расчетные фракционные распределения должны совпадать. Результаты опыта приведены в табл. 2.

Результаты контрольного опыта № 1

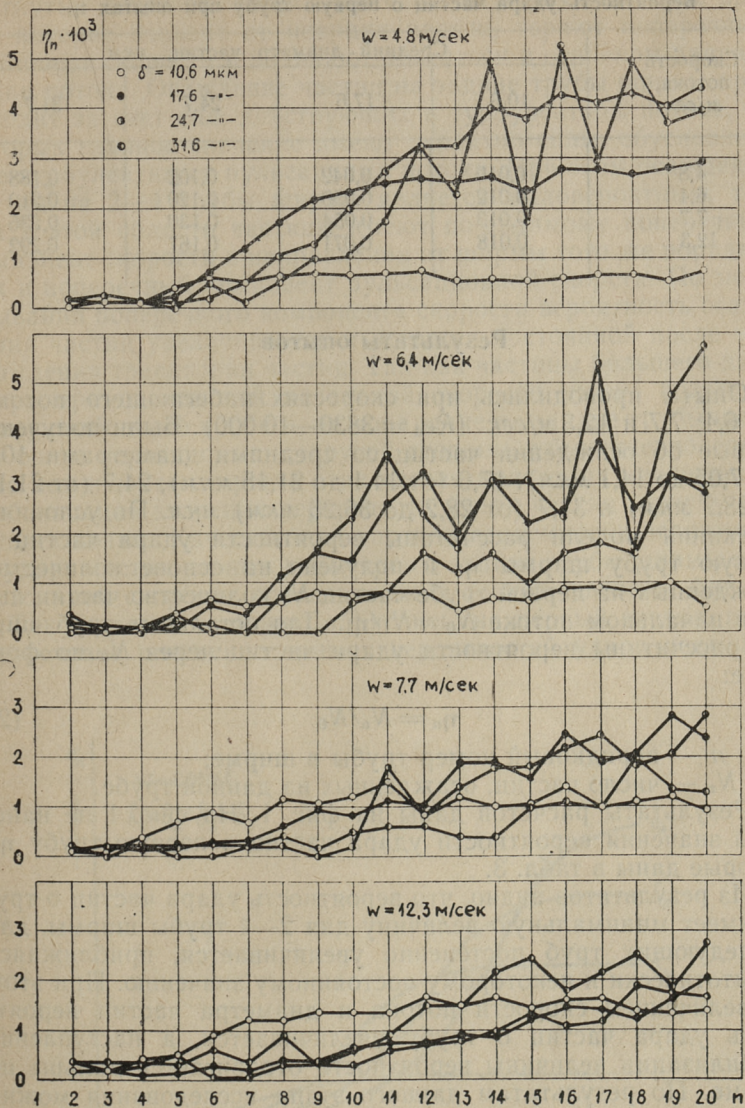
Средний диаметр частиц	мкм	13,9	27,9	43,5
Количество подсчитанных частиц пыли до ввода в канал	шт.	2908	3197	832
Фракционное распределение	%	41,9	46,1	12,0
Вероятность удара по [5]	—	0,037	0,221	0,503
Расчетно-фракционное распределение пыли на первой трубе	%	8,7	57,4	33,9
Количество подсчитанных частиц на первой трубе	шт.	70	402	254
Фракционное распределение	%	9,6	55,4	35,0

Таблица 2

Результаты контрольного опыта № 2

Средний диаметр частиц		мкм	10,6	17,6	24,7	31,7
Количество подсчитанных на первой трубе частиц	$w = 4,8 \text{ м/сек}$	шт.	521	644	422	130
	$w = 12,3 \text{ м/сек}$	шт.	3485	4723	2411	586
Фракционное распределение	$w = 4,8 \text{ м/сек}$	%	30,4	37,5	24,5	7,6
	$w = 12,3 \text{ м/сек}$	%	30,9	41,8	22,1	5,2
Вероятность удара по [5]	$w = 4,8 \text{ м/сек}$	—	0,010	0,042	0,103	0,192
	$w = 12,3 \text{ м/сек}$	—	0,018	0,071	0,166	0,291
Расчетное фракционное распределение исходной пыли	$w = 4,8 \text{ м/сек}$	%	72,1	21,3	5,7	0,9
	$w = 12,3 \text{ м/сек}$	%	70,4	23,5	5,3	0,8

Как видно из результатов контрольных опытов, совпадение расчетных и опытных данных хорошее, что подтверждает применимость данных одиночной трубы [5] для первой трубы ширмы. Некоторое расхождение, особенно при контрольном опыте № 2 ( $w = 4,8 \text{ м/сек}$ ) можно объяснить ограниченным числом подсчитанных частиц. Проверка распределения частиц пыли по периметру первой трубы также дала хорошее совпадение с данными [5].



Фиг. 1. Зависимость вероятности удара частиц о задние трубы ширмы от скоростей потока и диаметра частиц

Вероятность удара частиц о первую трубу при опытах  $\eta_1$ 

Скорость потока, м/сек	Средний диаметр частиц, мкм			
	10,6	17,6	24,7	31,7
4,8	0,010	0,042	0,102	0,188
6,4	0,012	0,050	0,120	0,219
7,7	0,013	0,054	0,130	0,236
12,3	0,018	0,071	0,167	0,292

### Результаты опытов

Опыты проводились при скоростях набегающего потока 4,8; 6,4; 7,7 и 12,3 м/сек ( $Re_d = 3830-10\ 000$ ). Были получены данные об осаждении частиц со средними диаметрами 10,6 (от 7,05 до 14,1 мкм), 17,6 (от 14,1 до 21,15 мкм), 24,7 (от 21,15 до 28,2 мкм) и 31,7 (от 28,2 до 35,25 мкм) мкм. По условиям обтекания модели рассчитаны вероятности удара частиц о первую трубу ширмы  $\eta_1$  и получено на основе количества осажденных на первой трубе частиц  $N_1$  количество частиц пыли в начальном потоке  $N_0 = N_1/\eta_1$ . Для остальных труб ширмы рассчитаны вероятности удара частиц через  $N_0$  по формуле:

$$\eta_n = N_n/N_0 \quad (2)$$

где  $n$  — порядковый номер трубы в ширме;

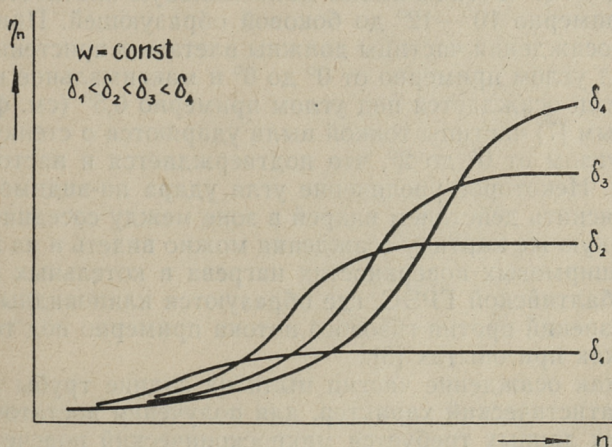
$N_n$  — число частиц, осажденных на данной трубе.

Результаты расчетов даны на фиг. 1. На фиг. 1 не нанесены значения вероятности удара частиц о первую трубу  $\eta_1$ , которые даны в табл. 3.

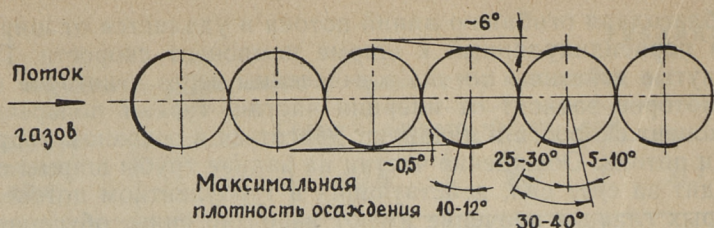
Из результатов видно, что вероятность удара частиц о трубу имеет минимальную величину для 2—4 трубы ширмы, для последующих труб постепенно увеличивается, приближаясь асимптотически к некоторому постоянному значению. При этом с увеличением скорости потока и диаметра частиц вероятность удара частиц о трубу увеличивается, а наступление стабилизации величины вероятности отодвигается дальше по ширме. По результатам данного этапа исследования можно представить следующую качественную картину обтекания ширмы запыленным потоком: на первую трубу осаждение частиц пыли происходит главным образом за счет инерции частиц, проходящих проекцию первой трубы [5]. При этом часть из этих частиц, количеством  $1-\eta_1$ , проходит мимо первой тру-

бы, благодаря огибанию линий потока и удаляется от ширмы, имея перпендикулярный к ширме компонент скорости. Подвергнутые действию потока эти частицы через некоторое время, которое зависит от инерции частиц, теряют поперечный компонент скорости и начинают двигаться в основном направлении потока. Осаждение частиц на задние трубы ширмы происходит за счет сил, действующих в турбулентном потоке, из которых главное значение имеют вероятно силы, обусловленные турбулентными пульсациями потока. При этом осаждение частиц на 2—4 трубы ширмы является маловероятным, так как в этой области частицы имеют по-видимому поперечный компонент скорости в направлении от ширмы того же порядка, как и поперечный компонент пульсационной скорости. По мере убывания поперечного компонента скорости вероятность осаждения частиц увеличивается и остается постоянной после выпрямления траектории частиц. Так как частицы большего диаметра при одинаковой начальной скорости имеют большую длину свободного пробега, их попадание на задние трубы ширмы более вероятно, но, с другой стороны, убывание поперечного компонента скорости этих частиц происходит медленнее и стабилизация значения вероятности удара частиц о трубу наступает позже. Качественная картина зависимости вероятности удара частиц разных диаметров о задние трубы ширмы при постоянной скорости потока должна соответствовать фиг. 2.

Такой схемой и можно объяснить, на первый взгляд, противоречивое поведение кривых вероятностей удара частиц о



Фиг. 2. Качественная картина зависимости удара частиц о трубы ширмы от диаметра частиц



Фиг. 3. Распределение осевших частиц по периметру труб ширмы

трубу при больших скоростях потока (фиг. 1,  $w = 7,7$  и  $12,3$  м/сек), где частицы большего диаметра имеют меньшую вероятность удара. При этих скоростях стабилизация траекторий частиц наступает за пределами ширмы, и область, охваченная ширмой при этих опытах, соответствует нескольким первым трубам ширмы на опытах при меньших скоростях.

Отсутствие данных о распределении скоростей потока и величин пульсационных скоростей вблизи ширмы не позволяет на данном этапе исследований определить стабилизированные величины вероятности удара частиц о трубу при опытах, для которых стабилизация происходит за пределами ширмы, что затрудняет математическое описание процесса осаждения.

Имеются также предварительные данные о распределении осевших на последние трубы ширмы частиц по периметру трубы. Осаждение происходит главным образом у боковых образующих трубы в секторе с углом примерно  $30^\circ$ — $40^\circ$ , как показано на фиг. 3. Частицы имеют максимальную плотность осаждения примерно  $10^\circ$ — $12^\circ$  до боковой образующей. При такой картине осаждения частицы должны влетать в пристенную область под углом примерно от  $0^\circ$  до  $6^\circ$  и максимальное количество частиц осаждается под углом примерно  $0,5^\circ$  (см. фиг. 3). По данным [7] частицы тонкой пыли ударяются о стенку канала под углом от  $0^\circ$  до  $2^\circ$ , что подтверждается и настоящими опытами. Некоторое увеличение угла удара по-видимому можно объяснить действием вихрей в зоне между соседними трубами. Такую же картину осаждения можно видеть и на загрязненных ширмовых поверхностях нагрева в котельных агрегатах Прибалтийской ГРЭС, где образуются клиновидные гребни загрязнений против газового потока примерно под теми же углами как при опытах [3].

Так как осаждение частиц пыли на задние трубы ширмы носит статистический характер, для получения достаточно достоверных данных требуется микроскопический подсчет большого количества частиц, что является трудоемкой операцией. Так, например, на опытах при скорости потока  $12,3$  м/сек на

каждой задней трубе ширмы, начиная с седьмой, подсчитаны около 600 частиц со средним диаметром 10,7 мкм и 7300 частиц на первой трубе. При всех опытах такие условия подсчета не соблюдены, чем и можно объяснить разброс опытных точек при некоторых опытах.

Хотя на данном этапе исследований отсутствует возможность обобщения результатов опытов и их перевод на действительные условия котлоагрегата, проведенные опыты дают представление об осаждении пыли на ширмовые поверхности и служат основой опытов для выявления влияния диаметра труб ширмы и плотности частиц на вероятность удара частиц о трубы ширмы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Н. В. Кузнецов, Л. И. Кропп. Вибрационная очистка ширмовых пароперегревателей от наружных отложений. Информационное сообщение Союзглавэнерго-ВТИ № Т-11/61. Москва, 1961, издание БТИ ОРГЭС.
2. И. П. Эпик. Влияние минеральной части сланцев на условия работы котлоагрегата. Эстгосиздат, 1961.
3. А. А. Отс, В. И. Резник. Труды ТПИ, серия А, № 209, 1963.
4. Н. Ф. Дергачев. Изв. ВТИ, № 6, 1949.
5. В. И. Игнатъев, И. И. Зверев. «Теплоэнергетика» № 3, 1961.
6. M. N. Golovin, A. A. Putnam. Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals, Vol. 1, Nr. 4, 1962.
7. W. Barth. Chemie-Ingenieur-Technik. 35, 1963.





УДК 621. 18:699, 18:620, 181. 5. 001. 5

*П. И. Ансон, Я. П. Лайд, А. П. Пообус*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР НА ПЛАСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТАЛИ Х25Т**

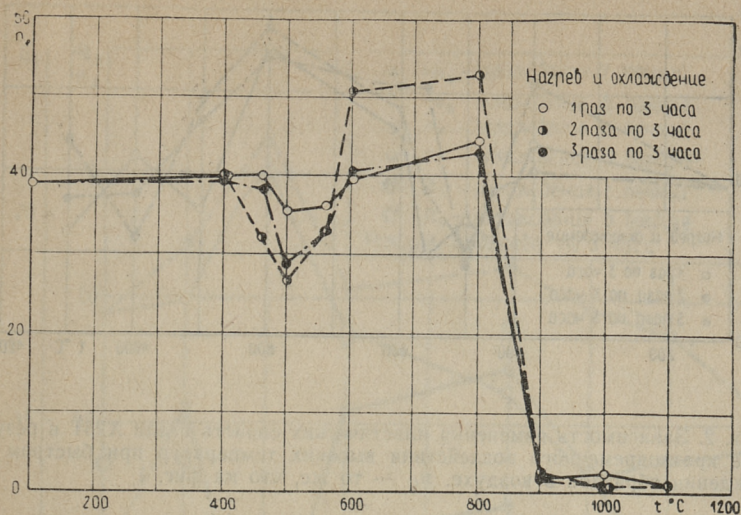
Возможность повышения температурного уровня технологических и энерго-технологических процессов зависит в первую очередь от наличия достаточно дешевых и недефицитных, обладающих определенными свойствами, сталей. В некоторых областях химического аппаратостроения, где к металлу предъявляются требования хорошей коррозионной стойкости при высоких температурах, все шире находит применение высокохромистая сталь Х25Т. Делаются первые попытки применения этой стали для поверхностей нагрева высокотемпературных теплообменных аппаратов в теплоэнергетике. Так, например, на одной из ТЭЦ «Эстонэнерго» построен опытный воздухоподогреватель, предназначенный для подогрева воздуха до 800°С продуктами сгорания жидкого топлива, трубы поверхности нагрева которого изготовлены из стали Х25Т.

Одной из особенностей стали Х25Т является ее охрупчивание, возникающее в результате воздействия высоких температур и проявляющееся при комнатной или близких к ней температурах, могущее обусловить разрушение труб поверхности нагрева вследствие изгибных деформаций, неизбежных при колебаниях температуры, особенно при частых пусках и остановках установки в период наладки. Опубликованные к настоящему времени результаты исследования этого явления несколько противоречивы, не являются исчерпывающими и не позволяют окончательно судить об условиях и возможности применения названной стали для изготовления трубчатых поверхностей нагрева высокотемпературных теплообменников и наметить рациональные режимы их эксплуатации. По одним данным для стали Х25Т наблюдается два температурных диапазона охрупчивания. Первый примерно при 475—500°С и второй при температуре выше 800—850°С [1, 2]. По другим данным резкое понижение пластических свойств наблюдается уже начиная с 300°С и имеет место при любых температурах

выше названной [3]. По имеющимся данным существенное влияние на понижение пластических свойств стали оказывает скорость охлаждения после выдержки при высоких температурах. При быстром охлаждении сталь охрупчивается значительно меньше, чем при медленном охлаждении. В то же время нет никакой разницы при охлаждении испытуемых образцов в воде и в воздухе [3]. Величина минимальной скорости охлаждения, при которой резко начинает проявляться охрупчивание, до настоящего времени оставалась невыясненной. Невыясненным является также влияние длительности выдержки при высоких температурах на понижение пластичности стали. В опубликованных данных указывается лишь, что понижение ударной вязкости возникает уже в результате кратковременной выдержки в опасной зоне температур. И, наконец, не исключена возможность влияния на пластические свойства стали X25T технологии плавки, технологии изготовления труб и содержания углерода и титана, поскольку стали на основе хрома, как известно, вообще исключительно чувствительны к названным факторам.

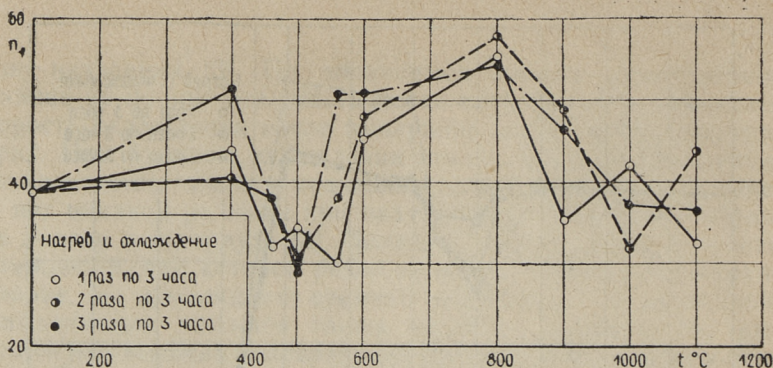
Все изложенное обусловило целесообразность исследования воздействия высоких температур именно на тот конкретный материал, из которого изготовлены трубы поверхности нагрева установки (трубы диаметром  $38 \times 1,5$  мм.  $S_{\gamma} = 25\%$ ,  $T_i = 0,6-0,7\%$ ,  $C = 0,08\%$ ). Ниже приводятся результаты проведенных исследований.

Исходной предпосылкой при разработке методики испытаний было принято, во-первых, то обстоятельство, что процессы, происходящие в стали при воздействии высоких температур и обуславливающее ее хрупкость, не зависят от нагрузки, формы изделия и наличия концентраторов напряжения и, во-вторых, что вид назначаемого механического испытания должен наиболее близко соответствовать реальным условиям работы металла в поверхности нагрева. Поэтому характеристика пластичности материала труб поверхности нагрева высокотемпературного воздухоподогревателя определялась по свойству образцов выдерживать определенное число перегибов. Образцы шириною 5 или 10 мм и длиной 100 мм вырезались из труб диаметром  $38 \times 1,5$  мм в продольном направлении. Испытания на перегиб проводились на стандартном приборе, схема которого приведена в ГОСТ 1579-42. Зажатые в прокладках прибора, имеющих радиус закругления 10 мм, образцы подвергались повторным изгибам на  $90^\circ$  попеременно в противоположные стороны со скоростью около 60 перегибов в минуту. Результаты испытаний приведены на фигурах 1, 2, 3, 5 и 6. На фиг. 1 приводится зависимость количества перегибов  $n_{\varphi}$  до разрушения образцов от температуры нагрева при одно-, двух-



Фиг. 1. Зависимость изменения пластических свойств стали X25T в результате кратковременного воздействия высоких температур при медленном охлаждении образцов вместе с печью.  $n_{\varphi}$  — количество перегибов на  $\pm 90^\circ$  до разрушения образцов

и трехкратном нагреве в течение трех часов и при медленном охлаждении образцов вместе с печью. Приведенные результаты показывают, что при сравнительно кратковременном нагреве до температур ниже  $800^\circ\text{C}$  исследуемая сталь сохраняет даже после медленного охлаждения достаточно высокие пластические свойства. Некоторое понижение этих свойств наблюдается при нагреве в интервале  $400\text{—}600^\circ\text{C}$ . Но и в этом случае материал остается достаточно пластичным и не вызывает опасений с точки зрения надежной работы в поверхностях нагрева. Отметим, что при медленном охлаждении стали от температур выше  $550^\circ\text{C}$  (прохождение интервала  $400\text{—}600^\circ\text{C}$  за 120 минут) понижения пластичности в данном случае не наблюдалось. Полученные результаты не подтверждают некоторых литературных данных о резком охрупчивании всех высокохромистых ферритных сталей в диапазоне температур порядка  $500^\circ\text{C}$  в результате кратковременной выдержки и медленного охлаждения. При выдержке исследуемой стали при температурах выше  $800^\circ\text{C}$  даже весьма кратковременной, например, в течение трех часов, и при медленном охлаждении начинается резкое понижение пластических свойств и образцы разрушались уже после загиба на небольшой угол. Кратность



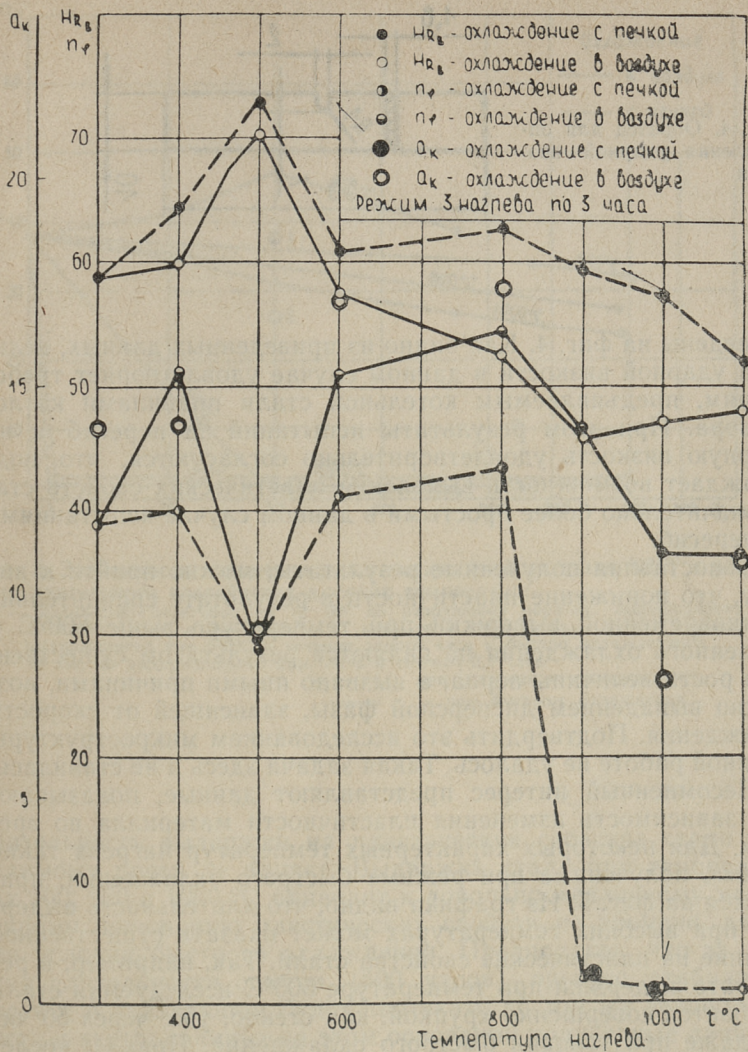
Фиг. 2. Зависимость изменения пластических свойств стали X25T в результате кратковременного воздействия высоких температур при быстром охлаждении образцов в воздухе.  $p_\phi$  — то же, что на фиг. 1

повторных нагревов и охлаждений, как видно из графиков 1 и 2, существенного влияния на изменение пластических свойств стали не оказывает.

Несколько иные результаты были получены при тех же режимах нагрева и выдержки при высоких температурах, но в случае быстрого охлаждения образцов в воздухе (200 град/мин), фиг. 2. В этом случае, как и при медленном охлаждении, некоторое увеличение хрупкости, не опасное однако с точки зрения возможности применения этой стали для труб поверхностей нагрева, наблюдается в диапазоне 400—600°C. В интервале температур 600—800°C имеет место некоторое повышение пластичности. Нагрев же выше 800°C при данном режиме не обуславливает сколько-нибудь существенного повышения хрупкости.

На фиг. 3 сопоставляются результаты испытаний, полученные при медленном и быстром охлаждении образцов, подвергнутых трехкратному повторному нагреву по 3 часа с промежуточными охлаждениями до комнатной температуры. Там же приводится зависимость твердости образцов по Роквеллу от температуры. Как видно, при температурах до 800°C графики изменения твердости и пластичности материала хорошо согласуются между собой. При температуре выше 800°C соответствие между ними нарушается и повышение хрупкости уже не характеризуется увеличением твердости.

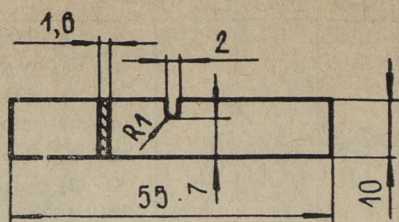
На этом же графике двойными кружками отмечены значения ударной вязкости  $a_K$ , полученные в результате испытания образцов, также вырезанных из труб. Размеры образцов



Фиг. 3. Сопоставление изменений пластических свойств стали X25T в результате кратковременного воздействия высоких температур при быстром и медленном охлаждении

- - - при медленном охлаждении,  
 — при быстром охлаждении.  
 a<sub>к</sub> — ударная вязкость,  
 n<sub>φ</sub> — то же, что на фиг. 1

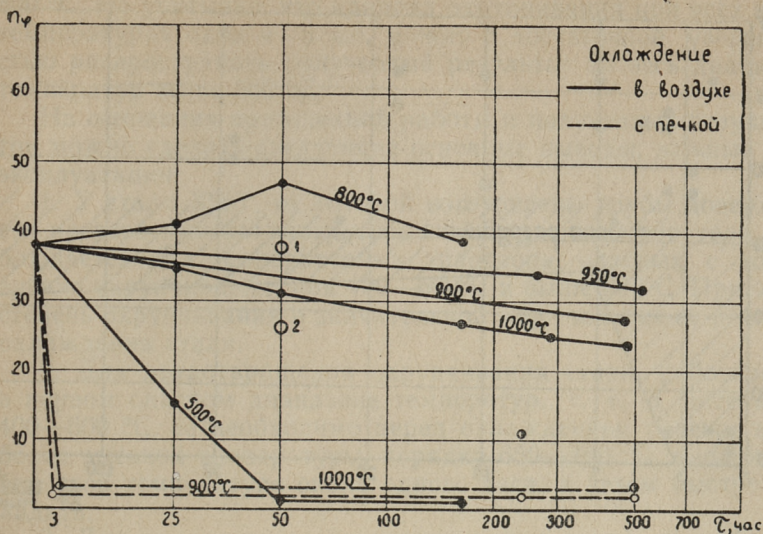
Фиг. 4. Образец для определения ударной вязкости



приведены на фиг. 4. Как видно из приведенных данных, величина ударной вязкости в данном случае удовлетворяет требованиям, предъявляемым котельной стали правилами котлонадзора. При этом результаты испытаний на перегиб и на ударную вязкость удовлетворительно согласуются, что подтверждает возможность выявления пластических свойств стали значительно более простыми в данном случае испытаниями на перегиб.

Сопоставляя полученные результаты, можно прийти к выводу, что понижение пластичности в результате сравнительно кратковременной выдержки при температуре выше  $800^{\circ}\text{C}$  и медленного охлаждения не являются результатом существенного роста величины зерна, а вызвано иными причинами, возможно выпадением дисперсной фазы, зависящей от скорости охлаждения. Подтвердить это исследованием микроструктуры в данной работе не удалось. Такая задача здесь и не ставилась.

Несомненный интерес представляют данные, показывающие зависимость изменения пластичности материала во времени. Для некоторых характерных температур нагрева такие данные, полученные при режиме быстрого охлаждения, приводятся на фиг. 5. Из графика видно, что длительность выдержки при высоких температурах может оказать существенное влияние на пластические свойства стали. Так, например, в результате выдержки при температуре  $500^{\circ}\text{C}$  исследуемая сталь становится совершенно хрупкой, как стекло, уже через 50 часов даже при условии быстрого охлаждения. Правда, последующим кратковременным нагревом до температуры порядка  $600\text{--}650^{\circ}\text{C}$  и быстрым охлаждением пластические свойства могут быть восстановлены. На фиг. 5 кружочками 1 и 2 большого диаметра указаны опытные точки, полученные в результате испытания образцов, выдержанных предварительно в течение 50 часов при температуре  $500^{\circ}\text{C}$ , охлажденных до комнатной температуры, снова нагретых до  $600^{\circ}\text{C}$ , и затем быстро охлажденных на воздухе ( $\Delta t/\Delta \tau = 200$  град/мин). Полученные данные показывают также, что при температуре  $800^{\circ}\text{C}$



Фиг. 5. Зависимость изменения пластических свойств стали X25T в результате длительного воздействия высоких температур:

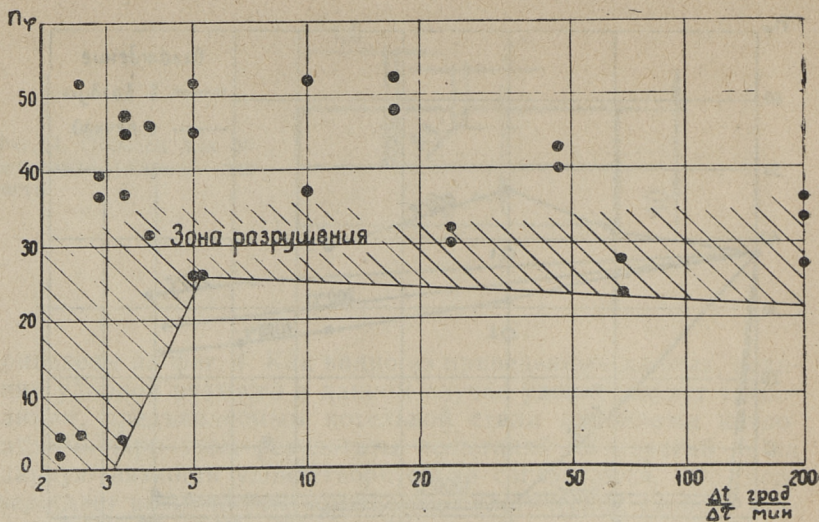
01 — количество перегибов на  $\pm 90^\circ$  до разрушения образца, выдержанного при  $500^\circ\text{C}$  50 часов, охлажденного до комнатной температуры, затем нагретого и выдержанного при  $600^\circ\text{C}$  в течение одного часа и быстро охлажденного,

02 — то же, но выдержанного при  $600^\circ\text{C}$  в течение 0,5 часа

— — — при медленном охлаждении,

— — — при быстром охлаждении.

длительность выдержки на пластические свойства стали по-видимому почти не влияет. Выдержка стали при температурах 900, 950 и  $1000^\circ\text{C}$  приводит к довольно медленному монотонному понижению пластических свойств во времени даже при условии быстрого охлаждения. Предполагая, что за период длительности опытов (500 часов) процесс стабилизировался и в дальнейшем будет протекать по той же закономерности и экстраполируя на этом основании полученные данные, получим, что при температуре выдержки  $1000^\circ\text{C}$  и при быстром охлаждении пластические свойства снизятся до опасной с точки зрения эксплуатации величины приблизительно через 100 000 часов. Природу этого явления — монотонного медленного понижения пластичности следует, по-видимому, объяснить ростом величины зерна. Измерения показали, что в результате выдержки стали при температуре  $1000^\circ\text{C}$  в течение 166 часов, размер зерна увеличился приблизительно на 47%. Следует при этом отметить, что явление роста зерна при вы-



Фиг. 6. Зависимость изменения пластических свойств стали X25T в результате воздействия высоких температур (900 °С) от скорости охлаждения:

$n_{\phi}$  — то же, на фиг. 1,  
 $\Delta t/\Delta \tau$  — скорость охлаждения, в град/мин.

соких температурах является, как известно, для высокохромистых ферритных сталей процессом необратимым.

На фиг. 6 приведены результаты исследования влияния на пластические свойства стали скорости охлаждения. Точками отмечено количество перегибов образцов до их разрушения при различных скоростях охлаждения  $\Delta t/\Delta \tau$ . Предварительно образцы выдерживались в течение трех часов при температуре 900 °С. Охлаждение производилось в печи при открытых торцах. При этом скорость охлаждения регулировалась реостатом питания печи вручную. Заданный график охлаждения обеспечивался с точностью  $\pm 20$  °С. Сплошная линия на графике соответствует нижней границе области разрушения образцов. Несмотря на значительный разброс результатов, причину которого выяснить не удалось, из графика ясно видно, что при скорости охлаждения выше 5 град/мин. пластические свойства стали сохраняются примерно на первоначальном уровне. При скорости же охлаждения менее 5 град/мин. происходит резкий скачок увеличения хрупкости.

В настоящей работе не исследовалась зависимость изменения пластических свойств стали X25T от скорости охлаждения образцов, выдержанных при других температурах выше



800 °С. Но учитывая, что природа охрупчивания при всех этих температурах одна и та же, можно с достаточной уверенностью распространить полученный результат на весь диапазон температур выше 800 °С.

На основании проведенной работы и полученных результатов можно сделать следующие основные выводы, важные для эксплуатации.

1. У стали Х25Т, из которой изготовлены трубы поверхности нагрева высокотемпературного воздухоподогревателя, наблюдается два температурных диапазона, опасных с точки зрения охрупчивания: при 400—600°С и выше 800°С. При этом степень охрупчивания в значительной мере зависит от режима охлаждения стали.

2. Для предотвращения охрупчивания стали, работавшей в первом опасном диапазоне температур, т. е. в интервале 400—600 °С, ее необходимо перед охлаждением перегреть до более высокой температуры, порядка 650—700 °С, выдержать при этой температуре около одного часа, а затем быстро охладить.

3. Для предотвращения охрупчивания стали, проработавшей при температурах выше 800 °С, надо ее охлаждать быстро.

4. Скорость охлаждения стали в диапазоне температур 900—300 °С не должна быть ниже 5 град/мин.

5. Несмотря на быстрое охлаждение в стали Х25Т наблюдается медленное монотонное снижение пластических свойств в результате длительного воздействия высоких температур, объясняемое по-видимому ростом зерна. Процесс этот для ферритных сталей является, как известно, необратимым.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Металловедение и термическая обработка стали. Справочник, т. II, под редакцией М. Л. Берштейна и А. Г. Рахштадта, 1962.
2. Справочник по машиностроительным материалам. Под редакцией Г. И. Погодина-Алексеева, т. I, 1959.
3. Б. Н. Шевелкин, Л. Л. Кравченко, А. П. Голованов. Исследование обрабатываемости ст. Х25Т. Журнал «Технологические процессы в химическом машиностроении», № 33, 1960.



ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА  
СБОРНИК СТАТЕЙ

Таллинский политехнический институт

Редактор В. Валликиви

Технический редактор Я. Мыттус.

Корректор Л. Лоопер

Сдано в набор 1. III 1965. Подписано к  
печати 7. I 1966. Бумага 60×90, 1/16. Пе-  
чатных листов 4,0. Учетно-издательских  
листов 3,25. Тираж 500 экз.

МВ-02101. Заказ № 2486.

Типография «Пунане Тяхт».

Таллин, ул. Пикк 54/58.

Цена 23 коп.



Цена 23 коп.