Ep. 6.7
240

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED

ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

СЕРИЯ А № 240

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

СБОРНИК СТАТЕЙ

VI

Под общей редакцией проф. И. П. Эпика

ТАЛЛИН 1966

Ep. 6.

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА
СЕРИЯ А № 240 1966

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

СБОРНИК СТАТЕЙ

VI

Под общей редакцией проф. И. П. Эпика

ТАЛЛИН 1966

СОДЕРЖАНИЕ

1. Х. Х. Арро, В. Э. Валликиви, И. П. Эпик. Некоторые особенности загрязнения конвективных поверхностей нагрева при сжигании назаровских углей и эстонских сланцев 3
2. Р. А. Круус. Исследование конвективной теплоотдачи ширмовой поверхности нагрева 15
3. А. А. Отс. О процессах загрязнения топок при сжигании сланцев 27
4. Х. П. Тааль, А. Я. Махлапуу, И. П. Эпик. Влияние температуры и среды на улетучивание соединений калия из золы эстонских горючих сланцев 45
5. В. А. Сельг. Влияние температуры стенки экранных труб на интенсивность загрязнения в топках, сжигающих сланцевую пыль 55
6. Н. С. Розанов, Г. А. Соо. К вопорсу микроскопического исследования частиц пылевидных сланцев 65
7. А. А. Отс, Э. А. Комп, Э. В. Юга, А. А. Отс. Влияние теплоты сгорания на удельный расход электроэнергии и интенсивность износа бил при размоле сланцев в шахтных мельницах . . 75

Eesti NSV Teaduslik Raamatukogu Teaduste Akadeemia
Ep. 7476

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА
СЕРИЯ А № 240 1966

УДК 621.182.1.001.5

Х. Х. Арро, В. Э. Валликиви, И. П. Эпик

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ КОНВЕКТИВНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НАГРЕВА ПРИ СЖИГАНИИ НАЗАРОВСКИХ УГЛЕЙ И ЭСТОНСКИХ СЛАНЦЕВ

Опыт использования эстонских горючих сланцев и назаровских углей в качестве энергетического топлива показывает, что надежность работы котлоагрегатов при сжигании обоих видов топлива уменьшается из-за загрязнения поверхностей нагрева. Образование на поверхностях нагрева плотных золовых отложений, рост которых может протекать со значительной скоростью, затрудняет эксплуатацию котлоагрегатов при номинальных нагрузках, а также требуются частые остановки котлоагрегатов для очистки.

Летучая зола как эстонских сланцев, так и назаровских углей содержит значительное количество CaO, что приводит к образованию сульфатно-связанных отложений, основным связывающим веществом в которых является $CaSO_4$ [1, 2 и 3]. В результате этого можно предполагать, что процесс образования отложений в обоих случаях мало отличается, и основные выводы о характере и закономерностях процесса загрязнения, сделанные на основе исследований одного вида топлива, вполне приемлемы и для другого вида топлива. Для выявления действительности этого предположения в данной работе рассматриваются и сравниваются результаты, полученные Таллинским политехническим институтом при исследованиях летучей золы и отложений назаровских углей и эстонских сланцев.

Исследования процесса загрязнения при сжигании назаровских углей проводились на котлоагрегатах ПК-38 Назаровской ГРЭС, где были отобраны пробы летучей золы и отложений, а также проведены опыты зондирования газоходов котлов для исследования начальной стадии образования отложений [4]. Основное внимание при этих исследованиях

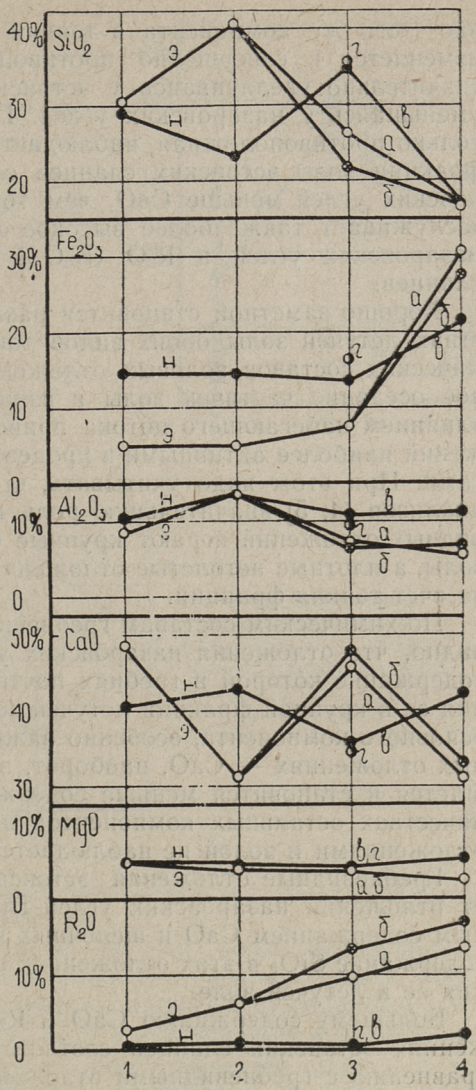
было обращено на загрязнение пароперегревателей, являющихся наиболее опасным местом в этом отношении. Из золовых отложений эстонских сланцев в данной работе рассматриваются главным образом отложения с опытного ширмового пароперегревателя, установленного в котлоагрегате ТП-17 Прибалтийской ГРЭС [5]. Химический состав сланцевой золы приведен по средним данным Э. Ю. Пиксарва.

Структура золовых отложений назаровских углей и эстонских сланцев по внешнему виду, несмотря на некоторое различие цвета, отличается относительно мало. У тех и других самым нижним, прилегающим к металлу труб, является весьма плотное, состоящее из мелкозернистого вещества, отложение (толщиной обыкновенно в несколько миллиметров), над которым находятся более рыхлые и длинные гребни. Однако замечено, что при сжигании назаровских углей гребневидные отложения на конвективных поверхностях нагрева образуются не всегда (или рост их является весьма медленным) и трубы часто покрыты только нетолстыми плотными отложениями. Основной предпосылкой для этого является относительно низкие температуры дымовых газов на выходе из топки. При высоких температурах, наоборот, как показали исследования [4], гребневидные отложения могут образовываться весьма быстро.

Опыты с помощью зондов, проведенные для изучения начальной стадии образования нетолстых плотных отложений, показывают, что процесс связывания частичек летучей золы с поверхностью трубы и образование плотного отложения протекает для эстонских сланцев значительно быстрее, чем для назаровских углей. Так, образование плотного золового отложения у эстонских сланцев на зонде наблюдается уже при опытах в течение нескольких часов [1], в то время как осевшие на зонде золовые частички назаровских углей связываются и образуют отложение только после длительного процесса [4].

При наличии существенной разницы в характере отложений и процессах загрязнения, эти различия непосредственно должны отражаться также в химическом и минералогическом составе летучей золы и отложений. Результаты химических анализов летучей золы и отложений назаровских углей и эстонских сланцев [4, 5] представлены на фиг. 1. Для более четкого представления значения отдельных компонентов в отложениях и золе, данные приведены в пересчете на бессульфатную массу.

Из представленных на фиг. 1 данных вытекает, что несмотря на общее высокое содержание CaO (более 40%), летучие золы эстонских сланцев и назаровских углей весьма



Фиг. 1. Распределение химических компонентов в летучей золе и отложениях назаровских углей и эстонских сланцев:

1 — циклонная зола эстонских сланцев (э) и крупная фракция летучей золы назаровских углей (н); *2* — зола из под электрофильтров эстонских сланцев (э) и тонкая фракция золы назаровских углей (н); *3* — гребневидные золовые отложения эстонских сланцев и назаровских углей; *4* — плотные золовые отложения эстонских сланцев и назаровских углей.

а — отложения эстонских сланцев, образовавшиеся при виброочистке ширм; *б* — то же, — образовавшиеся при очистке ширм обдувкой; *в* — отложения назаровских углей с поверхностей нагрева.

заметно различаются. Так как распределение летучей золы во фракциях условное и данные не совсем сопоставляемы, внимания заслуживает в основном ход изменения (увеличение или уменьшение) содержания отдельных компонентов во фракциях золы. Например, крупные фракции золы обоих топлив содержат почти одинаковое количество SiO_2, содержа-

ние этого же компонента в тонких фракциях золы, однако, изменяется в совершенно противоположных направлениях, значительно увеличиваясь у эстонских сланцев и несколько уменьшаясь у назаровских углей. Почти такая же картина, только противоположная, наблюдается для CaO, где крупные фракции золы эстонских сланцев содержат больше и назаровских углей меньше CaO, чем тонкие фракции. Внимание заслуживает также более высокое содержание Fe_2O_3 в золе назаровских углей и R_2O ($K_2O + Na_2O$) в золе эстонских сланцев.

Хорошо заметной становится разница в характере и свойствах летучей золы обоих видов топлива при сравнении химических составов золовых отложений, так как одновременное оседание частичек золы и изнашивание отложения под влиянием набегающего потока приводит к обогащению отложений наиболее активными в процессе загрязнения компонентами. При этом надо учитывать, что по данным оптических анализов [4, 5] значительную роль при образовании гребневидных отложений играют крупные фракции (более 10 *мкм*) золы, а плотные нетолстые отложения образуются в основном за счет тонких фракций.

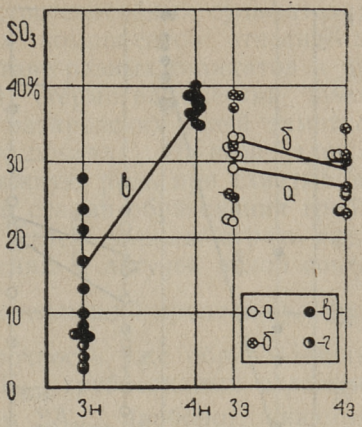
По химическим составам гребневидных отложений (фиг. 1) видно, что отложения назаровских углей обогащаются SiO_2, содержание которой в гребнях почти на 20% выше содержания ее в крупной фракции летучей золы. Содержание другого основного компонента, особенно важного в сульфатно-связанных отложениях — CaO, наоборот, в этих отложениях уменьшается и становится меньше содержания CaO в золе. В количествах остальных компонентов заметной разницы между отложениями и золой не наблюдается.

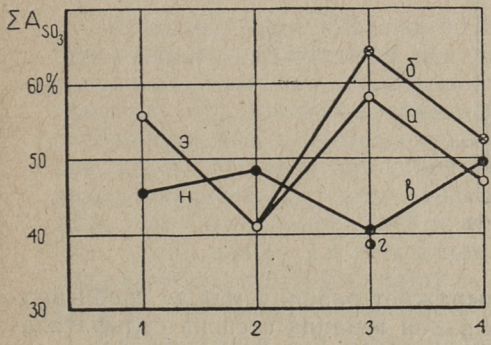
Гребневидные отложения эстонских сланцев отличаются от отложений назаровских углей главным образом повышеным содержанием CaO и щелочных металлов, в то время как содержание SiO_2 в этих отложениях несколько ниже содержания ее в летучей золе.

Большему содержанию CaO и R_2O в гребневидных отложениях эстонских сланцев соответствует также большее по сравнению с гребневидными отложениями назаровских углей содержание в них SO_3 (фиг. 2). Содержание SO_3 в последних по результатам химических анализов значительно колеблется (от 7,16% до 27,80%). Одной из причин такого колебания, по-видимому, является неодинаковый возраст отложений и весьма малая скорость их сульфатизации, так как отложения, продолжительность пребывания которых в газоходах небольшая (образовывались при забивании котла после четырехдневной работы без очистки), а также гребневид-

Фиг. 2. Содержание $SO_{3сульф}$ в золовых отложениях назаровских углей и эстонских сланцев:

3 — гребневидные отложения назаровских углей (н) и эстонских сланцев (э); *4* — плотные отложения назаровских углей (н) и эстонских сланцев (э);
а — отложения эстонских сланцев, образовавшиеся при виброочистке ширм; *б* — то же, образовавшиеся при очистке ширм обдувкой; *в* — отложения назаровских углей с поверхностей нагрева; *г* — то же, образовавшееся на зонде.

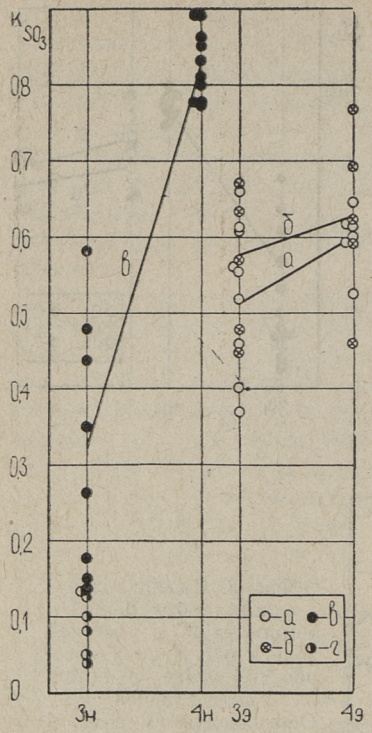




Фиг. 3. Содержание сульфатообразующих компонентов в летучей золе и отложениях назаровских углей и эстонских сланцев. Обозначения см. фиг. 1

ные отложения, полученные при опытах на зонде, содержат SO_3 всего лишь 2,25—8,36%.

Основными компонентами летучей золы, образующими сульфатные соединения в отложениях, являются CaO, MgO, K_2O и Na_2O. На фиг. 3 приведены данные о суммарном содержании этих компонентов (ΣA_{SO_3}) в летучей золе и отложениях обоих топлив (в пересчете на бессульфатную массу). Здесь хорошо видно, что количество компонентов, способных сульфатизироваться в гребневидных отложениях эстонских сланцев, значительно больше количества их в гребневидных отложениях назаровских углей. Также заметно, что ΣA_{SO_3} гребневидных отложений эстонских сланцев немного даже превышает ΣA_{SO_3} крупной фракции летучей золы, в то время как в гребневидных отложениях назаровских углей ΣA_{SO_3} ниже, чем в летучей золе.



Фиг. 4. Степень сульфатизации золовых отложений назаровских углей и эстонских сланцев.
Обозначения см. фиг. 2

Еще более наглядно выражает разницу между гребневидными отложениями обоих видов топлива степень сульфатизации (K_{SO_3}) отложений. Термином степени сульфатизации в данной работе обозначается соотношение действительного и теоретически возможного (рассчитанного по содержанию CaO, MgO, K_2O и Na_2O в отложениях или золе, предполагая, что они полностью могут сульфатизироваться) содержания SO_3 в отложениях. Таким образом

$$K_{SO_3} = \frac{SO_{3_д}}{SO_{3_т}}, \text{ где}$$

$$SO_{3_т} = 1{,}428\ CaO + 1{,}986\ MgO + 0{,}850\ K_2O + 1{,}292\ Na_2O.$$

Из представленных на фиг. 4 данных видно, что средняя K_{SO_3} гребневидных отложений у назаровских углей ниже, чем у эстонских сланцев, притом особенно низкой является K_{SO_3} в этих отложениях непосредственно после образования. Это значит, что гребневидные отложения назаровских углей содер-

жат не только меньшее количество способных сульфатизироваться компонентов, а из этих компонентов относительно большая часть находится в составе разных силикатов и других несульфатных соединений (термографический анализ проб гребневидных отложений назаровских углей заметного наличия в них свободной CaO не показал). Из вышеизложенного вытекает, что наиболее важную роль при схватывании частичек золы в первоначальной стадии образования гребневидных отложений назаровских углей должны играть соединения с повышенным по сравнению с летучей золой соотношением $\frac{SiO_2}{CaO}$, а постепенно протекающий процесс сульфатизации в основном повышает прочность уже образовавшихся отложений [4]. Более высокая K_{so_3} гребневидных отложений эстонских сланцев при большом ΣA_{so_3}, наоборот, указывает на значительное участие сульфатов в образовании отложений.

Несколько иная картина по сравнению с гребневидными отложениями наблюдается при рассмотрении результатов исследований плотных нетолстых отложений. Из основных компонентов, образующих гребневидные отложения, SiO_2 и CaO, содержание SiO_2 в плотных отложениях как у эстонских сланцев, так и у назаровских углей заметно уменьшается и становится значительно ниже содержания ее в летучей золе (фиг. 1). Содержание CaO в плотных отложениях назаровских углей выше, а в нетолстых плотных отложениях эстонских сланцев, наоборот, почти в 1,5 раза меньше содержания ее в гребневидных отложениях.

Характерным для обоих видов топлива является повышение Fe_2O_3 в плотных отложениях. Особенно резко (почти в 6 раз по сравнению с летучей золой) наблюдается это повышение у эстонских сланцев, где оно, по-видимому, частично является результатом коррозионного влияния летучей золы [6]. Летучая зола назаровских углей, однако, коррозионного влияния не имеет и увеличение (около 1,5 раза) содержания Fe_2O_3 в этих отложениях можно объяснить более активным участием соединений, содержащих железо в процессах образования отложений.

На основе представленных на фиг. 1—4 результатов исследований можно сказать, что различие между гребневидным и плотным отложениями назаровских углей заключается не просто в различном содержании отдельных компонентов в них, а существенным является их совершенно различный характер. Относительно небольшое содержание SiO_2, заметное повышение содержания способных сульфатизироваться ком-

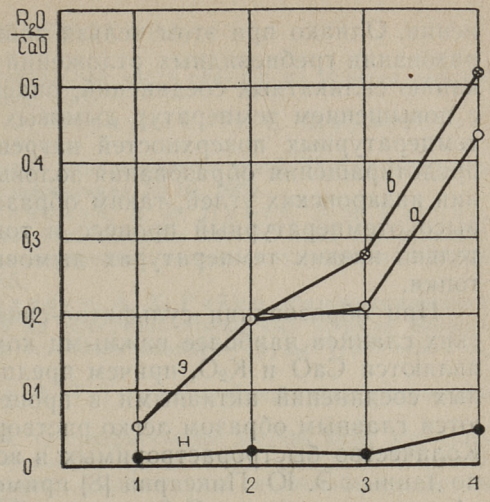
понентов (ΣA_{SO_3}, фиг. 3) и особенно SO_3 (фиг. 2), а также очень высокая степень сульфатизации (фиг. 4) по сравнению с гребневидными отложениями, подтверждают, что нетолстые плотные отложения назаровских углей являются чисто сульфатно-связанными отложениями, основным связывающим веществом в которых является $CaSO_4$. Медленно протекающий процесс образования и упрочнения этих отложений, как это показали опыты с зондами, однако указывает, что образование отложений происходит не только за счет сульфатизации свободной CaO, а здесь, по-видимому, протекают также более сложные процессы. Как известно, сульфатизация и упрочнение образцов летучей золы, содержащей свободную CaO, в частности золы эстонских сланцев, происходит значительно быстрее [1, 7].

Что касается нетолстых плотных отложений эстонских сланцев, то характер их не так резко отличается от характера гребневидных отложений. Меньшее количество SO_3 и ΣA_{SO_3} в них, наблюдаемое на фиг. 2 и 3, очевидно обусловлено повышением содержания Fe_2O_3 в этих отложениях, так как соотношение

$$\frac{CaO + MgO + K_2O + Na_2O}{SiO_2 + Al_2O_3 + CaO + MgO + K_2O + Na_2O}$$

в гребневидных и плотных отложениях почти одинаковое. Самой существенной разницей между гребневидными и плотными отложениями эстонских сланцев является весьма значительное увеличение содержания R_2O в плотных отложениях (фиг. 1 и 5).

Количество щелочных металлов в отложениях назаровских углей незначительное и содержание R_2O даже в плотных отложениях обыкновенно не превышает 1,5%. В процессах образования золовых отложений эстонских сланцев щелочные металлы, однако, могут играть весьма существенную роль (R_2O в отложениях эстонских сланцев почти полностью состоит из K_2O). О немалом значении R_2O при образовании плотных отложений эстонских сланцев свидетельствует не только заметное увеличение соотношения $\frac{R_2O}{CaO}$, наблюдаемое в этих отложениях (фиг. 5), а также нахождение на поверхностях опытного ширмового пароперегревателя очень плотных и высокосульфатизированных отложений (на тыльной стороне труб), где содержание K_2O достигает 19,2 — 45,0%, а в пересчете на бессульфатную массу 31,6 — 76,6% [5]. Степень сульфатизации в этих отложениях почти всегда



Фиг. 5. Изменение соотношения $\frac{R_2O}{CaO}$ в летучей золе и отложениях назаровских углей и эстонских сланцев. Обозначения см. фиг. 1

80—90%, а иногда и больше. Надо отметить, что по данным химических анализов степень сульфатизации в отложениях эстонских сланцев с увеличением содержания R_2O повышается. Этим можно также объяснить повышение K_{SO_3} в плотных отложениях по сравнению с гребневидными отложениями, наблюдаемое на фиг. 4.

Высокое содержание K_2O обнаружено не только в пробах отложений с опытного пароперегревателя. Пробы отложений (нижние слои) с относительно высоким содержанием K_2O (более 30% K_2O в пересчете на бессульфатную массу) были получены также с основных пароперегревателей катлоагрегатов ТП-17 при сжигании сланцев как нормального, так и пониженного качества.

На основе всего вышеизложенного можно сделать некоторые выводы о наиболее оптимальных, с точки зрения загрязнения конвективных поверхностей нагрева, топочных режимах при сжигании назаровских углей и эстонских сланцев.

Сульфатно связанный характер нетолстых плотных отложений назаровских углей и упрочнение гребневидных отложений при сульфатизации из-за образования $CaSO_4$ в них выдвигает необходимость уменьшения в летучей золе свободной CaO и способных сульфатизироваться соединений ее. Это можно достигнуть с помощью высоких температур в топке при работе котлоагрегата в режиме жидкого шлакоудаления. В этих условиях, при высоких температурах, CaO или значительно теряет свою активность из-за пережога, или связывается в разные инертные в процессе сульфатизации соеди-

нения. Однако при этом нельзя забывать о возможности образования гребневидных отложений на базе склонных к спеканию силикатных соединений, опасность которой возрастает с повышением температур дымовых газов в области высокотемпературных поверхностей нагрева. Для уменьшения или предотвращения образования золовых отложений при сжигании назаровских углей, таким образом ,можно рекомендовать высокотемпературный процесс в топке, однако, при относительно низких температурах дымовых газов на выходе из топки.

При образовании сульфатно-связанных отложений эстонских сланцев наиболее важными компонентами летучей золы являются CaO и K_2O, причем предполагается, что из щелочных соединений активными в процессе сульфатизации являются главным образом легко растворимые в воде соединения. Количество быстрорастворимых в воде щелочных соединений по данным Э. Ю. Пиксарва [8] примерно в 15—20 раз меньше общего содержания K_2O в золе. Повышение температур, по исследованиям улетучивания минеральных компонентов эстонских сланцев [9], значительно повышает интенсивность термического разложения минералов и улетучивания щелочных металлов, тем самым значительно увеличивая содержание растворимых в воде соединений щелочных металлов в золе. Надо также сказать, что до сих пор не изучено влияние на процесс загрязнения находящихся в летучей золе эстонских сланцев хлоридов, хотя хлориды, имея относительно низкие температуры плавления и испарения, по данным английских авторов [10] могут вызывать интенсивное загрязнение поверхностей нагрева.

Из вышеизложенного вытекает, что к повышению температур в топке при сжигании эстонских сланцев необходимо относиться весьма осторожно. Окончательное решение, однако, требует еще дополнительных исследований, так как возможное увеличение диффузионного сопротивления частичек золы из-за закупоривания пор при расплавлении [9] (например, при жидком шлакоудалении) не исключает возможность, что интенсивность улетучивания щелочных металлов при высокчх температурах окажется меньше предполагаемой.

ЛИТЕРАТУРА

1. И. П. Эпик. Влияние минеральной части сланцев на условия работы котлоагрегата. Эст. Гос. Изд., 1961.
2. Н. А. Синайский, А. Г. Меркулов, М. С. Шарловская. «Теплоэнергетика» № 12, 1964.
3. Совещание по энергетическому использованию углей Канско-Ачинского бассейна. Хроника, «Теплоэнергетика» № 10, 1965.
4. Х. Х. Арро, В. Э. Валликиви, А. В. Прикк, Э. Я. Ратник, А. А. Рейер, И. П. Эпик. Исследование летучей золы назаровского угля и ее отложений на поверхностях нагрева катлоагрегата. Труды ТПИ, серия А, № 226, 1965.
5. Х. Х. Арро, А. Я. Махлапуу, А. Х. Рейер. Физико-химическая характеристика отложений на поперечно-обтекаемых ширмах пароперегревателя при сжигании эстонских сланцев. Труды ТПИ, серия А, № 209, 1963.
6. И. П. Эпик, Х. Х. Арро, Э. Л. Томанн. «Энергомашиностроение» № 10, 1964.
7. Х. Х. Арро, И. П. Эпик. О сульфатизации летучей золы эстонских сланцев в атмосфере SO_2 + воздух. Труды ТПИ, серия А, № 132, 1958.
8. Э. Ю. Пиксарв. О щелочных соединениях в циклонной золе. Труды ТПИ, серия А, № 166, 1959.
9. Х. П. Тааль. Изв. вузов СССР — «Энергетика» № 10, 1964.
10. P. I. Jackson, I. M. Ward. «Journal of the Institute of Fuel», vol. 29, № 183, 1956.

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА
СЕРИЯ А № 240 1966

УДК 536. 244:621. 181. 8

Р. А. Круус

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНВЕКТИВНОЙ ТЕПЛООТДАЧИ ШИРМОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ НАГРЕВА

В последнее время в котельных агрегатах широко применяют поверхности нагрева, состоящие из ряда труб с большим шагом поперёк газового потока и с тесным расположением труб в направлении потока. Такие поверхности нагрева особенно распространены в мощных парогенераторах, где они называются ширмами. Продольный по направлению потока шаг труб в ширме s_2/d обычно находится в интервале 1,00—1,20 и поперечный шаг $s_1/d > 3$. В случае поперечного обтекания ширмы с продольным шагом $s_2/d < 1{,}20$ материалы для расчетов конвективной теплоотдачи ширмы неполные.

В настоящей работе двумя методами исследовали конвективную теплоотдачу ширм в поперечном потоке воздуха, направленного вдоль плоскости осей ширмовых труб.

Опыты произвели в диапазоне $Re_d = 1800—23\,000$ и $s_2/d = 1{,}00,\ 1{,}10$ и $1{,}15$.

Опытная установка и методика эксперимента

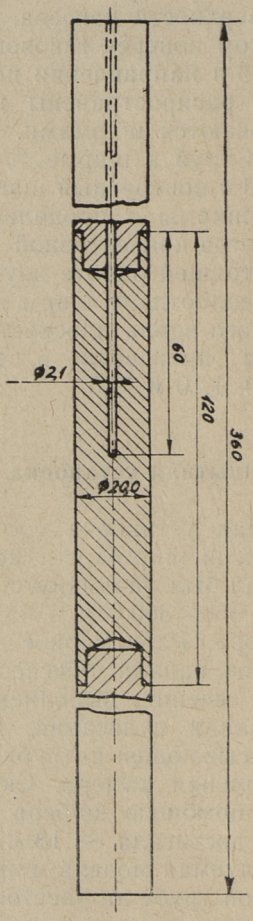
Опытная установка состояла из аэродинамического канала, модели ширмы и измерительной схемы. Аэродинамический канал был разомкнутого типа с квадратным поперечным сечением 360×360 *мм* и находился на всасывающей стороне вентилятора. Равномерное распределение скорости воздуха по сечению канала обеспечивалось плавным профилем его входного сечения, выполненным в форме лемнискаты. Для выравнивания пульсаций, вызванных работой вентилятора, перед всасывающей патрубкой вентилятора была установлена успокоительная камера. Скорость воздушного потока изменялась с помощью шибера с нагнетательной стороны вентилятора и достигала $\sim$ 18 *м/сек*.

Исследуемая модель ширмы была расположена в аэродинамической трубе на расстоянии $\sim$ 0,5 *м* от входа. Поле ско-

ростей на месте расположения ширмы измерялось в нескольких сечениях и имело прямой профиль. Для измерения скорости использовали термоанемометр ЭТАМ-3А.

Коэффициент турбулентности набегающего на ширму потока $\varepsilon = \frac{\sqrt{(u^1)^2}}{u}$ измеряли по методике термоанемометра ЭТАМ-3А. В средней части канала турбулентность набегающего на модель ширмы потока была в среднем 1,1%.

Исследование коэффициента теплоотдачи ширмовых труб производилось по методу полного теплового подобия. Поверхность ширмы была отшлифована и считалась гидравлически гладкой. Было использовано 2 типа калориметрических труб.



Фиг. 1. Калориметрическая трубка регулярного теплового режима

В первой серии опытов использовали калориметрические трубки, работающие на регулярном тепловом режиме. Исследование теплоотдачи методом регулярного теплового режима проводилось в ряде работ, в том числе [2, 3], и дало хорошее совпадение с результатами, полученными другими методами. Этот метод облегчает постановку эксперимента, так как не требует измерения тепловых потоков и распределения температурного поля по поверхности исследуемого тела.

Калориметрические трубки (фиг. 1) представляют собой трехсоставные цилиндры диаметром 20 *мм* со сверлением по оси диаметром 2,1 *мм*. Средняя часть цилиндра выполнена из Ст 20, концевые части из эбонита, плохо проводящего тепло. Спай дифференциальной термопары закладывали в сверление по оси цилиндра и при помощи конденсатора приваривали к металлической части калориметрической трубы. В работе использовали термопары хромель-копель. Линейность характеристики термопары $t = f[E]$ в использованной области температур контролировалась тарировкой термопары в термостате по образцовому термометру.

Ширма состояла из 6 калориметрических и 12 обыкновенных труб. Шаг ширмы изменяли установкой специальных алюминиевых прокладок между концами ширмовых труб. Для нагрева ширмы ее помещали в сушильный шкаф с температурой примерно 100°С. Подогретую до 80°С ширму поставили в аэродинамический канал. При помощи электронного потенциометра измеряли перепад температур между цилиндром и потоком воздуха. В начале опыта разница температур отдельных ширмовых труб не превышала $\pm 2{,}5$°С. Отсчет темпа охлаждения производился в интервале температур 70—40°С.

Коэффициент теплообмена определялся следующим путем. По результатам охлаждения модели строились кривые $\ln \vartheta = f(\tau)$, где ϑ — перепад температур между ширмой и потоком; τ — время. На прямолинейном участке этой кривой, который характеризует стадию регулярного теплового режима, определяется ее наклон m (темп охлаждения). Общий, средний по периметру ширмовой трубы, коэффициент теплоотдачи определяется по формуле

$$\alpha = m \frac{C}{\Psi s} \left[\frac{вт}{м^2 град}\right], \text{ где}$$

C — полная теплоемкость калориметрической части ширмовой трубы.

Удельную теплоемкость материала цилиндра определяли по [4].

s — теплоотдающая поверхность цилиндра,

Ψ — критерий неравномерности температурного поля внутри цилиндра.

Для определения Ψ высчитывали критерий

$$p = R\sqrt{m/a}\text{, где}$$

R — радиус цилиндра,

a — коэффициент температуропроводности.

Используя таблицы $\Psi = f(p)$ в [9], определяли Ψ.

Значение Ψ во всех случаях было больше 0,98.

Конвективный коэффициент теплоотдачи $\alpha_к$ определялся как разность.

$$\alpha_к = \alpha - \alpha_и,$$

где $\alpha_и$ — коэффициент теплоотдачи излучением.

Степень черноты поверхности цилиндра определялась относительным методом. В качестве эталона использовали цилиндр, поверхность которого была покрыта тонким слоем сажи. $\alpha_и$ вычисляли при средней температуре опыта —55°С.

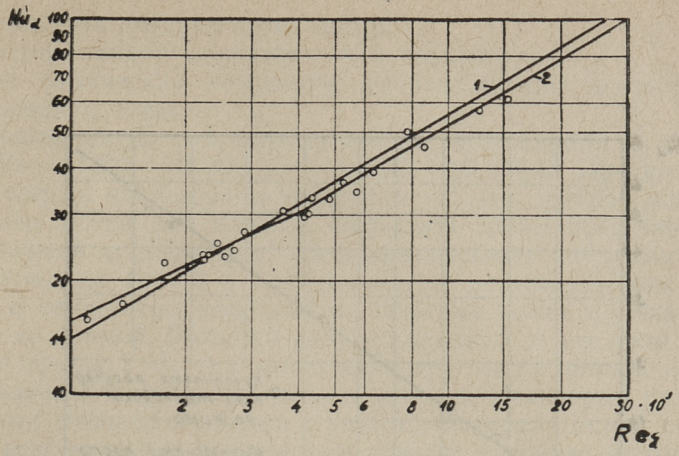
Исследовалась теплоотдача ширмы, состоящей из 11 труб. При этом за последней калориметрической трубой всегда было не меньше шести обыкновенных труб.

Для контроля данных, полученных методом регулярного теплового режима, вторая серия опытов производилась методом постоянного теплового потока. Калориметрическая трубка постоянного теплового потока состояла из латунной средней части с эбонитовыми наконечниками. Внутри латунной части трубки закладывался электрический нагреватель. Измеряли ток I, проходящий через нагреватель и падение напряжения U в средней части нагревателя. Питание нагревателя производилось постоянным током из аккумуляторной батареи. Расход мощности электрического нагревателя регулировали при помощи реостата. На поверхности калориметра было укреплено несколько медь-константоновых термопар. Для контроля равномерности распределения температур по периметру цилиндра в контрольных опытах калориметрическую трубку поворачивали вокруг своей оси. Во время опыта температуру поверхности отдельных ширмовых труб поддерживали равной с точностью $\pm 0{,}2$°С. Температурный напор между поверхностью калориметра и набегающего потока не превышал 10°С. Коэффициент теплоотдачи определяли

$$\alpha = \frac{I \cdot U}{s \cdot v}\left[\frac{вт}{м^2 град}\right]\text{, где}$$

s — наружная поверхность калориметрической части трубы.

Для контроля работы отдельных калориметрических трубок произвели опыты, где их использовали как одиночные



Фиг. 2. Теплоотдача различных поперечно-обтекаемых калориметров:
1 — Формула А. А. Жукаускаса

$$Nu_d = 0{,}25\, Re_d^{0{,}6}\, Pr_{ж}^{0{,}38} \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_{c}}\right)^{0{,}25};$$

2 — формула Э. Р. Г. Эккерта по опытным данным Р. Гильперта
$Nu_d = 0{,}43 + 0{,}48\, Re_d^{0{,}5} \quad Re_d = 1 - 4 \cdot 10^3$
$Nu_d = 0{,}43 + 0{,}174\, Re_d^{0{,}618} \quad Re_d = 4 \cdot 10^3 - 4 \cdot 10^4$

цилиндры в поперечном потоке. Результаты опытов представлены на фиг. 2. Прямыми на фигуре обозначены известные данные Р. Гильперта и А. А. Жукаускаса.

Обработка опытных данных и анализ результатов

Все опытные данные обрабатывали в критериальном виде. Теплоотдача каждой трубы ширмы представлялась в виде зависимости $Nu_d = f\ (Re_d)$

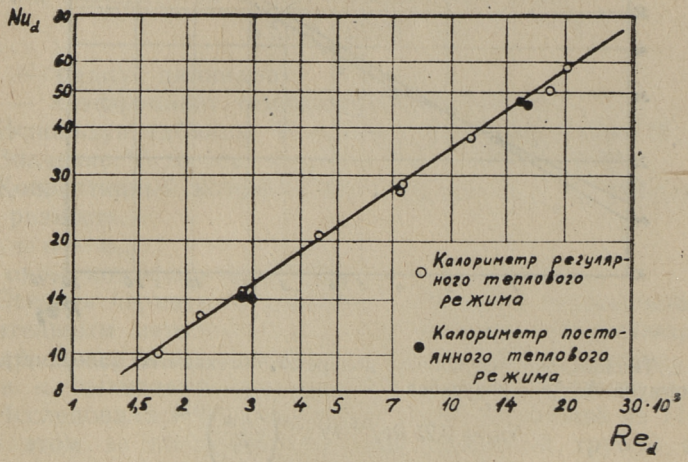
$$Nu_d = \frac{\alpha_к d}{\lambda}, \text{ где}$$

$\alpha_к \left[\frac{вт}{м^2 град}\right]$ — коэффициент теплоотдачи конвекцией,

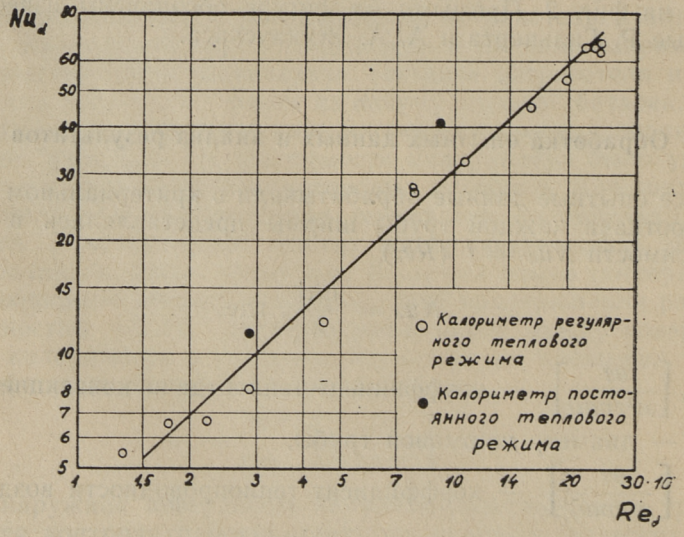
$d[м]$ — диаметр ширмовой трубы,

$\lambda \left[\frac{вт}{м\ град}\right]$ — коэффициент теплопроводности воздуха.

$$Re_d = \frac{u \cdot d}{\nu}.$$



Фиг. 3. Теплоотдача шестой трубы ширмы при шаге труб в ширме $^{s_2}/_d = 1{,}00$



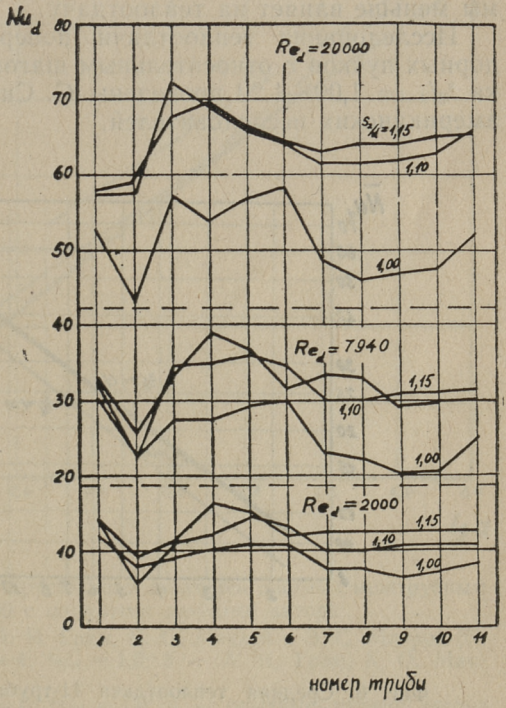
Фиг. 4. Теплоотдача второй трубы ширмы при шаге труб в ширме $^{s_2}/_d = 1{,}15$

u — скорость воздуха перед ширмой,
ν — коэффициент кинематической вязкости.

Все физические константы вычисляли при температуре набегающего потока.

Конвективную теплоотдачу ширмы исследовали в диапазоне $Re_d = 1800 — 23000$ и $s_2/d = 1{,}00$, 1,10 и 1,15. При каждом шаге ширмы исследовали теплоотдачу 11-ти трубной ширмы. Опытные точки для каждой ширмовой трубы представляли на графике с двойными логарифмическими координатами. Например, на фиг. 3 и 4 представлены результаты для двух труб. В выбранных координатах опытные точки хорошо сходятся на прямой. Больший разброс опытных точек дали ширмовые трубы 2÷5, так как в передней части ширмы поток, обтекающий ширмы, еще не установился. Некоторый разброс опытных точек объясняется и тем, что во время опыта оказалось невозможным строгое выполнение условия, чтобы оси всех труб ширмы были на одной плоскости.

На фиг. 5 показана теплоотдача отдельных ширмовых труб при трех значениях Re_d. Ввиду того, что имеется разброс



Фиг. 5. Теплоотдача отдельных труб ширмы при различных межтрубных шагах

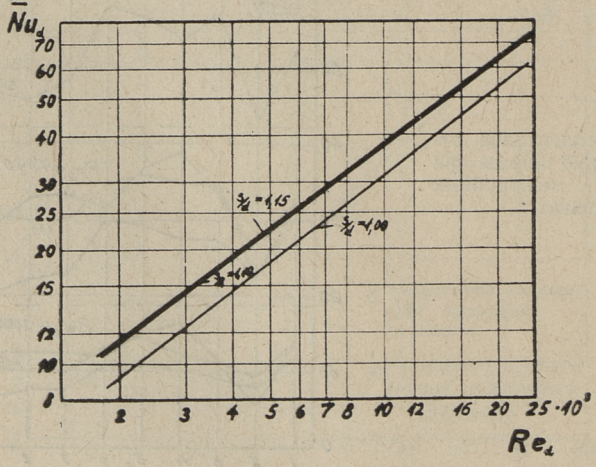
опытных точек случайного характера, выбрали такие опыты, где опытные точки были возможно ближе к прямой, которая характеризует общую закономерность.

На фиг. 5 видно, что омывание ширмы значительно отличается от омывания коридорных пучков с продольным шагом $s_2/d > 1{,}25$. У коридорных пучков теплоотдача первых труб обычно меньше средней теплоотдачи пучка, так как первые трубы пучка представляют из себя турбулизирующую решетку. У ширмы теплоотдача за четвертой ширмовой трубой заметно уменьшается.

При относительном шаге труб в ширме $s_2/d = 1{,}10$ и 1,15 теплоотдача ширмы стабилизировалась уже на 8—9-й трубе. Теплоотдача ширмы при шаге $s_2/d = 1{,}00$ на 11-ой трубе ширмы еще не стабилизировалась и необходимы дополнительные опыты с ширмой, состоящей из большего числа труб.

На фиг. 6 представлены средние значения Nu_d для 11-трубной ширмы при различных шагах труб в ширме. Видно, что увеличение относительного шага труб в ширме от 1,00 до 1,10 влечет за собой увеличение теплоотдачи ширмы примерно на 20%. Дальнейшее увеличение межтрубного шага ширмы меньше влияет на теплоотдачу.

Исследования теплоотдачи поперечно-обтекаемых коридорных пучков с относительным шагом по направлению потока $s_2/d = 1{,}00—1{,}20$ проведены С. Синицким и коллективом американских исследователей.



Фиг. 6. Средняя теплоотдача 11-трубной поперечно-обтекаемой ширмы при различных шагах труб в ширме

С. Синицкий [6, 7] представляет свои опыты с поперечно-обтекаемой ширмой в виде зависимости

$$Nu_d = c \cdot Re_d^{0{,}65},$$ где

коэффициент c изменяется в зависимости от расположения трубы в ширме и шага ширмы.

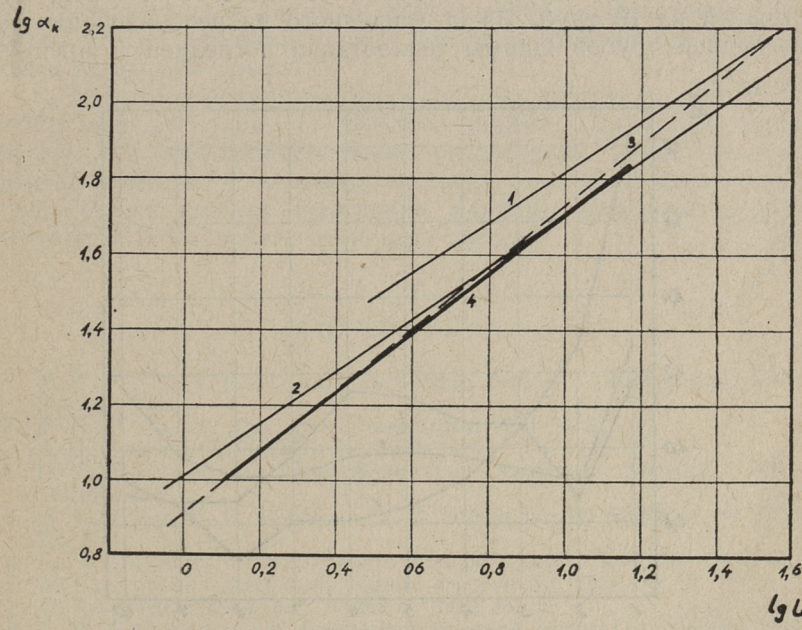
Американские исследователи Грам, Маккей, Монрое и Джонс [5, 10] всесторонне исследовали теплообмен более чем в десяти случаях различных конструктивных параметров коридорного пучка труб. В том числе они исследовали коридорный пучок, где $s_1/d \times s_2/d$ равнялись 6×1 и 4×1. Результаты обработки опытных данных представлены в виде графиков

$$j = St \cdot Pr^{2/3} = f(Re_d),$$ где

St — критерий Стантона,

Pr — критерий Прандтля.

В перечисленных работах принимались различные температуры при подборе физических постоянных. При таком



Фиг. 7. Сравнение результатов других исследователей ширмы с межтрубным шагом $s_2/d = 1{,}00$ с опытными данными автора:

1 — С. Синицкий [6, 7]; *2* — А. И. Грам, К. О. Маккей и Э. С. Монрое [5]. Коридорный пучок $s_1/d = 4$; $s_2/d = 1{,}0$; *3* — А. И. Грам, К. О. Маккей и Э. С. Монрое [5].

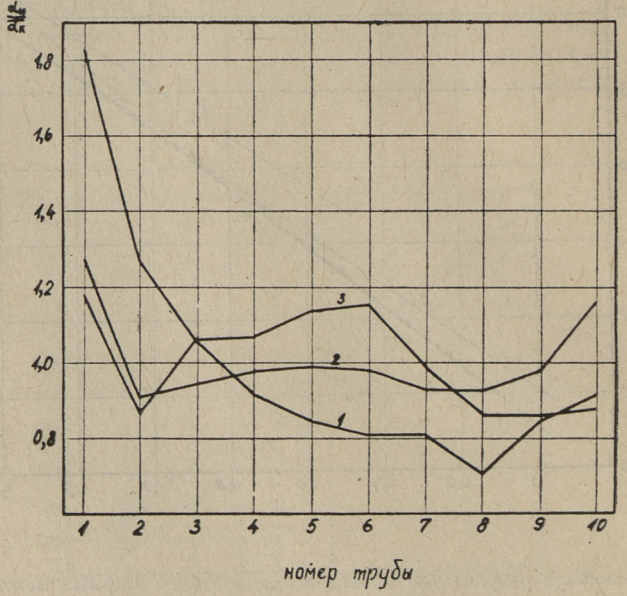
Коридорный пучок $s_1/d = 6$; $s_2/d = 1{,}0$; *4* — опытные данные автора

положении сравнивались величины коэффициентов теплоотдачи $\alpha_к$. Сравнительные расчеты были выполнены для средних условий, имевших место при исследованиях, проведенных автором. Было принято $d = 20$ *мм*; $n = 10$; $t_c = 55°C$; $t_п = 20°C$, где n — число труб в ширме; t_c — температура поверхности ширмовых труб; $t_п$ — температура омывающего потока.

На фиг. 7 представлены результаты опытов других исследователей и автора. Различие между данными нескольких авторов объясняется различными условиями опыта. Влияние на теплоотдачу ширмовых труб оказывает начальная турбулентность потока, а также соотношение $\frac{d}{h}$, где h расстояние между поверхностью ширмы и стенкой канала.

На фиг. 8 представлены опытные данные разных авторов по изучению теплоотдачи отдельных ширмовых труб. $\bar{\alpha}_к$ на фигуре обозначает среднюю теплоотдачу 10-трубной ширмы.

Исследования других авторов проведены с ширмой, состоящей из 10 труб. Из-за усиленного вихреобразования за последней трубой ширмы теплоотдача последней и предпо-



Фиг. 8. Теплоотдача отдельных труб ширмы при $s_2/d = 1{,}00$ и $Re_d = 7000 \div 8000$ по данным разных авторов:
1 — К. Э. Джонс и Э. С. Монрое [10]; *2* — С. Синицкий [6, 7]; *3* — результаты автора

следней ширмовой трубы повышается. Исследования автора сделаны при условии, что за последней калориметрической трубой ширмы было еще не менее шести труб, т. е. относятся к так называемой бесконечной ширме. Кроме того, в опытах Синицкого и Грама, Маккей и Монрое скорость газового потока измеряли при помощи диафрагмы, как среднюю по сечению канала. Как показано в [8], средняя скорость в данном диапазоне критерия *Re* канала отличается от скорости на оси канала, где расположены калориметрические части труб, на 7%.

Выводы

1. Двумя методами исследована конвективная теплоотдача ширмы в поперечном потоке. Получено хорошее совпадение между опытными данными обоих методов.

2. Полученные для 11-трубной ширмы результаты опытов сравнивались с данными других авторов. Некоторое различие между данными разных авторов объясняется различными условиями опыта.

3. Теплоотдача ширмы с межтрубным шагом $s_2/d = 1{,}00$ не стабилизируется на 11-трубной ширме. Для получения формул расчета конвективной теплоотдачи ширм следует провести опыты с ширмой, состоящей из большого числа труб. Также требует выяснения влияние начальной турбулентности набегающего на ширму потока.

ЛИТЕРАТУРА

1. Э. Р. Эккерт, Р. М. Дрейк. Теория тепло- и массобмена. ГЭИ, Москва, 1961.
2. В. М. Легкий. Изв. вузов Энергетика, 1958, № 3.
3. А. И. Чаплина. ИФЖ, т. У, 1962, № 6.
4. Н. Б. Варгафтик. Теплофизические свойства веществ. ГЭИ, Москва, 1956.
5. A. J. Gram, C. O. Mackey, E. S. Monroe. Tr. ASME, v. 80, 1958. Nr. 1.
6. S. Siennicki. Prace Instytutu techniki ciepluy, 1964, Nr. 24. Lodz.
7. S. Siennicki. Archiwum bugowy maszyn XI, 1964, Nr. 1.
8. G. Leppert. Tr. ASME, Series C, 1962, Nr. 3.
9. Г. М. Контратьев. Регулярный тепловой режим. Гостехиздат, 1954.
10. C. E. Jones, E. S. Monroe. Tr. ASME, v. 80, 1958, Nr. 1.

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА
СЕРИЯ А № 240 1966

УДК 621. 182. 9. 001. 5

А. А. Отс

О ПРОЦЕССАХ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ТОПОК ПРИ СЖИГАНИИ СЛАНЦЕВ

Введение

Топливной базой для бурноразвивающейся энергетики Северо-Западных районов СССР являются прибалтийские горючие сланцы, которые располагаются в Эстонской ССР и Ленинградской области. Одним из решающих вопросов при использовании горючих сланцев как энергетического топлива является создание новых мощных котлоагрегатов и усовершенствование существующих. Эксплуатационный опыт и научно-исследовательские работы показывают, что при создании мощных сланцевых котлов необходимо в первую очередь исходить из принципов, которые вытекают из специфических свойств сланцев.

Первостепенную, иногда и решающую роль на компоновку поверхностей нагрева, условия теплообмена и экономические показатели котлоагрегата оказывают не только техническая характеристика (влажность, зольность, теплота сгорания и др.), но и физико-химические свойства неорганической части топлива (химический и минералогический состав, температурная характеристика плавкости золы).

В связи с увеличением мощности котлоагрегатов и повышением параметров пара в настоящее время одной из важнейших проблем в котельной технике является проблема загрязнения поверхностей нагрева отложениями летучей золы, охватывающая следующие основные вопросы (имеются в виду процессы, происходящие в пылесланцевых топках):

1. Преобразование неорганической части топлива в топочном процессе (разложение и улетучивание компонентов неорганической части топлива, образование новых минералов, плавление частичек золы и т. д.).

2. Влияние образовавшихся в топочном процессе золы и продуктов сгорания на металл поверхности нагрева, т. е. проблема образования химически активного подслоя на поверхности нагрева.

3. Взаимодействие летучей золы и топочных газов с образовавшимся подслоем, скорость переноса золы на поверхности нагрева и скорость роста слоев отложений.

4. Влияние загрязнения поверхностей нагрева на условия теплообмена.

Перечисленными проблемами (в общем смысле) занимались многие ученые как в Советском Союзе, так и заграницей [1—15 и др.].

До недавнего времени главной научно-технической проблемой являлась проблема загрязнения, коррозии и износа конвективных поверхностей нагрева сланцевых котлов. Проблема загрязнения, а следовательно и влияние ее на теплообмен, в топках котлов среднего давления не была решающей.

При переходе на более мощные котлы высоких параметров пара резко увеличилась интенсивность загрязнения топочных поверхностей нагрева и вопросы загрязнения экранов и теплообмена в топках сланцевых котлов стали первостепенными.

В настоящей обзорной статье кратко рассматриваются и анализируются вышеотмеченные проблемы.

Характер загрязнения экранных поверхностей нагрева сланцевых котлов

В настоящее время котлоагрегаты, работающие на эстонских горючих сланцах при сжигании их в пылевидном состоянии, можно разделить на три группы.

1. Котлоагрегаты среднего давления ($p_{пс}$ = 30—40 *бар*, $t_{пс}$ = 420—450°С) с паропроизводительностью D = 5,5—22 *кг/сек* (ТП-20, ТП-35, БКЗ 75-39 Ф, «Рилей-Стокер» и «Буккау»). Топки этих котлов полностью экранизированы испарительными трубами и оборудованы фронтально расположенными горелками (главным образом открытыми амбразурами, соединенными с шахтными мельницами). Топки работают с теплонапряженностью топочного объема q_v = 125—180 *квт/м*^{3}. Температура экранных труб находится в пределах $t^э_{ст}$ = 260—280°С. Топки оборудованы обдувочными приборами типа ОПР-5.

Экраны этих котлов при обдувке их с частотой 0,12—0,25 *1/ч* являются эксплуатационно чистыми. Условный коэффициент загрязнения таких лучевоспринимающих поверхностей нагрева [16] непосредственно после обдувки не ниже ζ_0 = 0,75—0,70.

По характеру загрязнения топочные поверхности нагрева котлов среднего давления типа БКЗ 75—39 Ф могут быть разделены на две части. Фронтальная стена и около 70%

боковых стен являются относительно чистыми, только локально покрыты тонкими черными слоями отложений, толщина которых колеблется в пределах 0,1—0,3 *мм*. Эти тонкие слои отложений располагаются главным образом на фронтальных, по отношению к обдувочным струям, сторонах труб. Отмеченный слой содержит $K_2O = 7{,}3\%$, $CaO = 27{,}3\%$, $Fe_2O_3 = 8{,}4\%$, $SO_{3_{общ}} \cong SO_{3_{сульфаты}} = 18{,}9\%$ и около 2% углерода. Названный химический состав является не типичным для подслоя отложений, образовавшегося на экранных трубах пылесланцевых котлов. Задняя стена и остальная часть боковых стен покрыты слоем твердого отложения, толщина которого на уровне амбразур доходит до 5—7 *мм*. Выше и ниже уровня амбразур толщина отложений меньше.

2. Котлоагрегаты высокого давления ТП-17 ($p_{пе} = 98$ *бар*, $t_{пе} = 540°C$) с паропроизводительностью 61 *кг/сек*. Топка экранирована испарительными трубами, за исключением потолка, который покрыт трубами пароперегревателя. Топки имеют угловые горелки, индивидуально соединенные с шахтными мельницами. Теплонапряженность топочного объема $q_v = 120$ *квт/м*^{3}. Температура экранных труб $t^э_{ст} = 330—340°C$, т. е. 60—70°C выше, чем на котлах среднего давления. Топка котла ТП-17 оборудована обдувочными приборами типа ОПР-5.

Экраны котлов ТП-17 загрязняются намного сильнее, чем топки котлов среднего давления. Частота обдувки экранов колеблется в пределах 0,5—0,7 *1/ч*. Из-за интенсивного загрязнения через каждые 1500—2000 *ч* (в зависимости от средней нагрузки) котел останавливается для механической очистки экранов. Условный коэффициент загрязнения лучевоспринимающих поверхностей нагрева, в зависимости от времени с момента пуска котла после механической очистки топки, лежит в пределах $\zeta_0 = 0{,}35—0{,}70$.

Экранные трубы котлов ТП-17 до фестона равномерно по периметру топки покрыты твердыми отложениями. Толщина отложений (несдуваемый слой) является максимальным в районе расположения горелок и 1—2 *м* над ними, доходя после 1500—2000 часовой работы котла с момента механической очистки топки до 12—15 *мм* (в среднем). В отдельных частях топки встречаются отложения толщиной 20—25 *мм* и больше. На уровне нижнего края фестона толщина отложений меньше (2—4 *мм*). Выше этого уровня фронтовая стена и часть боковых стен покрыты отложениями незначительной толщины.

3. Котлоагрегаты высокого давления ТП-67 (р=138/22 бар, $t_{пе} = 570/570°C$) паропроизводительностью 89 *кг/сек*. Задние и боковые стены экранированы испарительными тру-

бами, фронтовая часть покрыта поочередно экранными панелями из испарительных и пароперегревательных труб, а потолок топки — трубами пароперегревателя. Теплонапряженность топочного объема $q_v = 105$ *квт/м*^{3}, температура испарительных труб $t^э_{ст} = 360—370°C$, температура труб пароперегревателя в топке (максимальная) $t^{пп}_{ст} = 440—450°C$. Топка имеет восемь фронтально расположенных турбулентных горелок, соединенных четырьмя молотковыми мельницами. Очистка стен топки производится обдувочными приборами ОПР-5.

Характер загрязнения задней стены и боковых стен приблизительно такой же как у котлов ТП-17. Фронтовая стена, начиная с 2—3 *м* выше горелок до уровня нижнего края выступа, покрыт в основном плотными отложениями незначительной толщины (1—2 *мм*). Особенно сильно загрязняется верхняя часть топки. В тех частях поверхности топки, где температура стенки выше (трубы пароперегревателя в сравнении с трубами испарительных поверхностей на фронтовой стене), отложения более прочно связаны с металлом труб. Несколько иной характер загрязнения топки котла ТП-67 в сравнении с топками котлов ТП-17 объясняется различными аэродинамическими схемами топочных камер и горелочных устройств. Более детальные данные о величине условного коэффициента загрязнения лучевоспринимающих поверхностей нагрева топки котла ТП-67 до сих пор отсутствуют.

Химический состав летучей золы

В топочном процессе под воздействием высоких температур и топочных газов в неорганической части сланцев происходят различные физико-химические преобразования. Вследствие этого образовавшаяся в топочном пространстве зола отличается как по химическому, так и по минералогическому составу от неорганической части сланцев. Вопросами преобразования неорганической части сланцев при их нагревании, а также изучением свойств летучей золы, оседавшей в золоулавливающих устройствах, занимались многие ученые [6—9, 17—20 и др.].

Не вся образовавшаяся в топочном процессе зола проходит газоходы котла. В условиях топки с сухим шлакоудалением (имеется в виду сжигание топлив в пылевидном состоянии) часть золы выпадает в виде шлака в холодной воронке. Свойства летучей золы, проходящей топку и газоходы котла в зависимости от топочных режимов, до сих пор изучены мало.

Таблица 1

Химический состав летучей золы и шлака

№№ п. п.	№ пробы	Наименование пробы	Производительность котла D, кг/сек	Компоненты, в %										
				SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	$SO_{3общ}$	$SO_{3сульфаты}$	$SO_{3общ} - SO_{3сульфаты}$	Cl'
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	37-а	летучая зола	35	27,00	3,95	7,20	48,61	5,65	3,51	0,07	6,81	6,68	0,13	0,42
2	37-б	шлак							2,28	0,16	2,40	2,28	0,12	
3	31-а	летучая зола	52	27,38	3,92	6,81	48,93	5,72	3,65	0,08	6,65	6,50	0,15	0,37
4	31-б	шлак		18,56	5,00	4,46	60,20	8,97	1,57	0,04	2,54	2,29	0,25	0,25
5	39-а	летучая зола	40	28,19	3,59	8,42	45,56	4,51	3,87	0,07	6,64	6,04	0,60	0,16
6	39-б	шлак							1,54	0,03	8,41	2,41	6,00	
7	43-а	летучая зола	47	30,67	4,62	7,77	42,87	4,07	4,49	0,16	6,65	6,60	0,05	0,48
8	43-б	шлак		21,94	6,09	6,48	58,17	4,84	1,59	0,12	2,60	2,47	0,13	0,09

Химический и минералогический состав летучей золы зависит от целого ряда факторов, а главным образом от температурного уровня в топке (адиабатическая температура сгорания, условия теплообмена) и от состава топочной среды (концентрация O_2, CO_2, CO, H_2 и др.). Кроме того, несомненно, определенное влияние оказывают также размер частиц топлива, время пребывания их в топочном объеме и другие факторы. До сих пор более подробно исследовано влияние температуры и состава газовой атмосферы на интенсивность улетучивания отдельных минеральных компонентов из сланцевой золы [8, 9]. Опыты показали, что интенсивность выделения щелочных металлов из золы в атмосфере окиси углерода на несколько порядков выше, чем в окислительной среде.

Условия преобразования неорганической части топлива можно условно разделить на три группы:

1. Преобразование минералов внутри частицы.

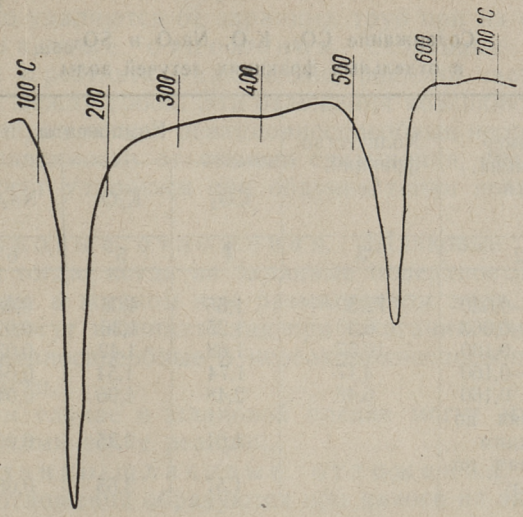
2. Улетучивание отдельных минеральных компонентов из частиц, взаимодействие улетучившихся компонентов с другими частицами золы и образование мелкодисперсных минералов (аэрозолей).

3. Образование новых минералов при контактировании между отдельными частицами.

Образовавшиеся в топочном процессе химически активные минералы, соединяясь в конкретных условиях с металлом поверхности нагрева котлоагрегата, образуют т. н. подслой, который является начальной стадией образования химически связанных отложений.

В таблице 1 приведен химический состав летучей золы и шлака из котла ТП-17. Пробы летучей золы уловлены трубкой Альнера из газохода за экономайзером. Одновременно с пробами летучей золы из течек холодной воронки котла были взяты пробы шлака. Пробы №№ 31, 37 и 39 получены при сжигании сланцев открытой добычи из карьера «Сиргала», а проба № 43 при сжигании сланцев шахтной добычи. При взятии пробы № 39 летучей золы и шлака коэффициент избытка воздуха за топкой $\alpha''_т \approx 1$. В других опытах $\alpha''_т$ колебался в пределах 1,20—1,35.

Из данных, приведенных в таблице 1, видно, что химический состав летучей золы отличается от химического состава шлака. Содержание CaO в шлаке заметно больше, чем в летучей золе, а содержание SiO_2, наоборот, в шлаке меньше. При $\alpha''_т > 1$ летучая зола содержит общей серы 2,5—3 раза больше, чем шлак, а при топочном режиме, где $\alpha''_т \approx 1$, в шлаке $SO_{3_{общ}}$ заметно больше, чем в первом случае. Сера в



Фиг. 1. Термограмма гидратированной пробы летучей золы из котла ТП-17

летучей золе и шлаке содержится главным образом в виде сульфатной серы. Содержание сульфидной серы (определялась на основе разности $SO_{3общ} - SO_{3сульфатн}$) мало. Но при этом соотношение между $S_{сульфатн}$ и $S_{сульфидн}$ в шлаке меньше, чем в летучей золе. Из приведенных данных также выясняется, что отмеченное соотношение зависит от коэффицента избытка воздуха в топке. При работе с малыми коэффициентами избытка воздуха содержание сульфидной серы как в летучей золе, так и в шлаке заметно больше.

Из данных растворимости летучих зол в воде видно, что из летучей золы, полученной при $\alpha_т'' \approx 1$, растворяется около 24%, а из золы, полученной при $\alpha_т'' > 1$ (при такой же паропроизводительности котла), только 15%.

Изложенные данные подтверждают, что одним из факторов, от которого зависит химический и минералогический состав летучей золы, является коэффициент избытка воздуха в топке $\alpha_т$. Поэтому можно предполагать, что активность летучей золы при взаимодействии с металлом труб и образовавшихся слоев отложений зависит от $\alpha_т$.

Содержание отдельных химических компонентов в различных фракциях летучей золы различно (см. табл. 2). Как видно из предлагаемых данных, содержание щелочных ме-

Таблица 2

Содержание CO_2, K_2O, Na_2O и $SO_{3общ}$ в отдельных фракциях летучей золы

№№ п. п.	Размер фракций, *мм*	Количество фракций, %	Компоненты, в %			
			CO_2	K_2O	Na_2O	$SO_{3общ}$
1	2	3	4	5	6	7
1	0,000—0,050	72,50	1,55	4,06	0,081	7,53
2	0,050—0,063	6,30	1,25	1,36	0,027	3,29
3	0,063—0,100	10,57	1,68	1,42	0,035	2,95
4	0,100—0,160	4,17	1,74	1,54	0,041	3,13
5	> 0,160	6,46	2,48	1,96	0,041	3,84
6	Средняя по фракциям		1,61	3,35	0,069	6,23
7	Средняя по анализу		1,57	3,65	0,08	6,65

таллов и общей серы в мелких фракциях больше, чем в крупных. Это подтверждают также данные Э. Ю. Пиксарва [19].

Типичная термограмма гидратированных проб летучей золы, полученной из котла ТП-17, приведены на фиг. 1. Характерным для этих термограмм является наличие двух эндотермических пиков. Первый, в области температур 100—200°С (дегидрация алюмосиликатов, гидросиликатов кальция и гипса), а другой при 500—600°С (дегидрация $Ca(OH)_2$).

Классификация отложений на экранных поверхностях нагрева топок

В зависимости от физико-химической характеристики неорганической части топлива, условий в топочном пространстве (температура и состав газов, размер и сепарация частиц, время пребывания частиц в топке), в неизотермическом пограничном слое около топочных стен (толщина, температура, масообмен) и на поверхности (температура, химические и механические свойства поверхности), отложения на экранных поверхностях нагрева можно разделить на четыре группы.

1. Сыпучие отложения. Сыпучие отложения образуются из частиц летучей золы, которые связаны с поверхностью экранных труб и между собой механически. В зависимости от условий сыпучие отложения могут образоваться при сжигании топлив, имеющих как реакционноспособные, так и

нереакционноспособные неорганические части. Сыпучие отложения легко удаляются от экранных труб при их обдувке.

2. Связанные отложения. Связанные отложения образуются в результате химических реакций частиц золы с металлом и между собой. Эти отложения возникают при сжигании топлив, имеющих реакционноспособные неорганические части. В зависимости от степени связывания, связанные отложения могут удаляться при обдувке топки полностью или частично.

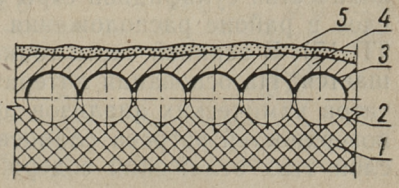
3. Шлаковые отложения. Шлаковые отложения образуются тогда, когда на экранные поверхности попадают частицы золы в жидком или размягченном виде. Шлаковые отложения могут возникать так при сжигании топлив, имеющих реакционноспособные и нереакционноспособные неорганические части.

В первом случае в шлаковой пленке могут иметь место различные химические реакции.

4. Связанно-шлаковые отложения. Связанно-шлаковые отложения образуются при наносе на экранные поверхности нагрева одновременно частиц в жидком, размягченном и твердом виде в результате взаимного реагирования их между собой.

В зависимости от конкретных условий, на экранные поверхности нагрева пылесланцевых котлов с сухим шлакоудалением могут образоваться сыпучие, связанные и связанно-шлаковые отложения. Связанно-шлаковые отложения образуются обычно в зонах высоких температур факела. Микроскопический анализ связанно-шлаковых отложений показывает, что расплавленные частицы золы являются химически активными центрами, которые связывают наносимые на поверхности нагрева твердые частицы золы. В зонах с умеренной температурой газов, где все частицы золы находятся в твердом виде, образуются сыпучие или связанные отложения. Загрязнение экранных труб при образовании связанно-шлаковых отложений является более интенсивным.

Связанные или связанно-шлаковые отложения, образовавшиеся на экранных поверхностях топок при очистке их обдувкой, состоят из трех отличных друг от друга слоев (см. фиг. 2).



Фиг. 2. Схема расположения слоев отложений на экранные трубы топки:
1 — обмуровка, *2* — экранные трубы, *3* — подслой, *4* — несдуваемый слой, *5* — сдуваемый слой

1. Подслой. Подслой располагается непосредственно на поверхности металла труб и твердо с ним связан. Подслой имеет толщину 0,2—0,5 *мм*.

2. Несдуваемый слой. Несдуваемый слой располагается над подслоем и во время обдувки экранных труб не удаляется. Несдуваемый слой имеет большую механическую прочность. Прочность на сжатие проб несдуваемых отложений из котла ТП-17 доходит до 35 *мн/м*^{2}.

3. Сдуваемый слой. Сдуваемый слой располагается над несдуваемым слоем и удаляется с поверхности при обдувке. Сдуваемый слой связан с несдуваемым слоем слабо и имеет пористую структуру.

Химический состав отложений на экранных трубах

В соответствии с вышеприведенной классификацией с экранных труб котлов ТП-17 и БКЗ 75—39Ф были взяты пробы отложений по слоям. Химический состав названных слоев приведен в табл. 3. Приведенное в таблице относительное расстояние X рассчитано как отношение расстояний от верхнего края холодной воронки к полной высоте топки (от верхнего края холодной воронки до потолка). Пробы №№ 1—6 взяты во время текущего ремонта (сжигались сланцы открытой добычи), а пробы №№ 7—8 во время капитального ремонта котла (сжигались сланцы шахтной добычи).

Из приведенных данных видно, что все слои отложений имеют иной химический состав, чем летучая зола. Это обусловлено различными физико-химическими процессами, происходящими в слоях отложений и в топочном пространстве (механическая сепарация частиц, химические реакции в слоях отложений, диффузия отдельных компонентов и др.).

Подслой и несдуваемый слой в сравнении с летучей золой обогащены серой. Если сера в летучей золе содержится главным образом в виде сульфатной серы, то подслой содержит в значительном количестве сульфидную серу (сульфидная сера здесь, как и в летучей золе, определена на основе разности $SO_{3_{общ}} - SO_{3_{сульфатн}}$). Соотношение количества сульфидной серы к количеству общей серы в подслое в районе расположения горелок доходит до 0,8 (котел ТП-17). В верхней части топки названное соотношение уменьшается. На основании литературных данных [1, 22] и результатов химических анализов проб отложений из конвективных поверхностей нагрева сланцевых котлов выясняется, что подслой этих отложений содержит сульфидную серу в незначи-

Таблица 3

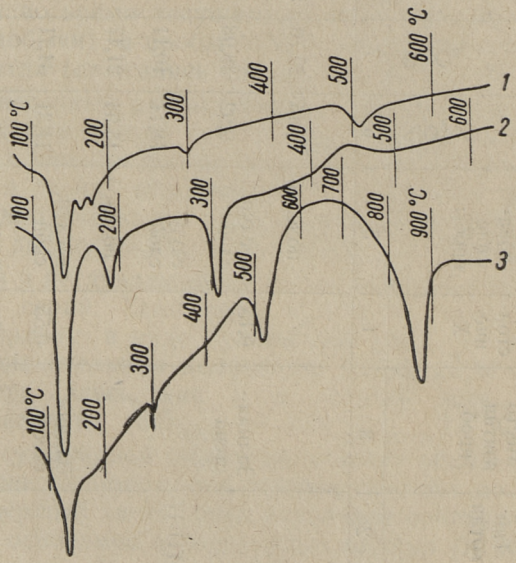
Химический состав отложений из экранных труб из сланцевых котлов

№№ п. п.	Тип котла	Место взятия проб	Расстояние X	Наименование пробы	Компоненты, в %										
					SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	$SO_{3\,общ}$	$SO_{3\,сульфатн}$	$SO_{3\,общ} - SO_{3\,сульфатн}$	Cl′
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	ТП-17	Задняя стена	0,15	подслой	13,45	22,70	5,63	38,24	3,66	1,93	0,07	12,63	3,81	8,82	0,17
2				несдув. слой	9,92	38,98	1,09	23,23	2,29	4,89	0,09	19,08	18,34	0,74	0,35
3				сдув. слой	18,11	10,11	4,68	48,93	4,50	3,01	0,02	11,23	11,22	0,01	0,18
4				подслой	15,94	21,47	4,23	39,77	3,19	3,14	0,03	13,06	9,15	3,91	1,10
5		Задняя стена	0,55	несдув. слой	11,31	34,71	5,86	27,00	1,13	4,45	0,03	14,99	14,99	—	0,41
6	БКЗ 75—39Ф			сдув. слой	20,65	13,35	5,31	48,88	3,60	1,72	0,04	6,63	6,60	0,03	0,11
7		Задняя стена	—	подслой	17,16	30,02	4,33	27,46	1,63	3,66	0,11	17,80	11,60	6,20	0,79
8		Против амбразур		несдув. слой	15,71	24,52	4,86	27,42	2,52	7,38	0,17	16,77	15,99	0,78	1,27

тельном количестве. В несдуваемых и сдуваемых слоях сера содержится главным образом, в виде сульфатной серы. При этом содержание серы в несдуваемых отложениях значительно меньше, чем в плотных отложениях с конвективных поверхностей нагрева.

Содержание CaO в подслое и несдуваемом слое заметно меньше, чем в летучей золе. При этом подслой содержит CaO больше, чем несдуваемый слой (котел ТП-17). На фиг. 3 приведены типичные термограммы гидратированных проб сдуваемых и несдуваемых слоев и подслоя из топки котла ТП-17. Судя по этим термограммам можно утверждать, что часть CaO в подслое и сдуваемом слое находится в свободном виде (эндотермический эффект в интервале температур 500—600°С). Такого термического эффекта пробы несдуваемых отложений не имеют. Выясняется также, что пробы несдуваемых отложений содержат значительное количество сульфата кальция (дегидрация $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ в интервале температур 100—200°С). В пробах подслоя и сдуваемых отложений названные эндотермические эффекты выявляются не так сильно.

Многие исследователи [1, 2, 5, 9, 22, 23 и др.] считают, что одним из факторов, способствующим образованию плотных



Фиг. 3. Термограммы гидратированных проб отложений из экранных труб котла ТП-17:

1 — сдуваемый слой, *2* — несдуваемый слой, *3* — подслой

отложений, является наличие щелочных металлов. Из щелочных металлов сланцевая зола содержит в заметном количестве калиевые соединения (см. табл. 1 и 3). Термограммы отложений всех типов имеют эндотермический эффект дегидрации сингенита при температуре около 300°С, что свидетельствует о наличии сульфата калия в отложении. Из данных, приведенных в таблице 3, видно, что несдуваемый слой содержит калиевые соединения заметно больше, чем подслой.

Все слои отложений содержат Fe_2O_3 больше, чем летучая зола, особенно несдуваемый слой из топки котла ТП-17.

О факторах, влияющих на интенсивность загрязнения экранных труб

Причиной возникновения несдуваемых, связанных или связанно-шлаковых отложений на поверхности нагрева топок сланцевых котлов является образование на экранные трубы химически активного подслоя, который сильно связан с металлом труб и способен химически реагировать с частицами золы, наносимыми на поверхности из топочного пространства. В. Н. Головин высказал мнение [26], что химический состав первоначального слоя, образовавшегося на поверхности экранных труб топок сланцевых котлов, почти не отличается от химического состава летучей золы. Это справедливо только при низких температурах поверхности, расположенной в зонах с умеренно падающими лучистыми потоками при отсутствии механической сепарации частиц золы. Как показывают химические анализы отложений, микроскопические исследования подслоя и зависимость условий образования подслоя от температуры металла и интенсивности излучения факела, химический и минералогический состав подслоя не всегда сходится с химическим и минералогическим составом летучей золы. Поэтому необходимо рассматривать условия образования подслоя не только в зависимости от механических факторов, но нужно также учитывать химические факторы, т. е. химическое взаимодействие наносимого на поверхности нагрева летучей золы с металлом.

Вторым вопросом, наряду с вопросами образования подслоя, является связывание летучей золы с подслоем, скорость роста несдуваемых и сдуваемых слоев.

Из основных факторов, влияющих на образование и скорость роста отдельных слоев отложений на экранные поверхности сланцевых котлов, необходимо назвать следующие (имеются в виду образования связанных и связанно-шлаковых отложений):

1. химический и минералогический состав неорганической части топлива;
2. поля температур в топочном объеме;
3. поле концентрации топочных газов и летучей золы, гранулометрический состав золы;
4. температура экранных труб;
5. аэродинамика топки;
6. частота и интенсивность очистки экранных труб.

Химический и минералогический состав неогранической части топлива в совокупности с другими перечисленными факторами определяет свойства образовавшейся в топочном процессе летучей золы и ее химическую активность (в данных условиях) относительно металла поверхности нагрева и образовавшихся слоев отложений.

Перечисленные факторы влияют одновременно на различные физико-химические процессы образования отложений на экранные поверхности нагрева топок. Так, например, от концентрации топочных газов зависит процесс преобразования неогранической части топлива, а также скорость химических реакций с частицами золы и металлом поверхности нагрева. Поскольку перечисленные факторы влияют одновременно друг на друга, то методически трудно исследовать влияние этих факторов в отдельности. Поэтому необходимо изучить условия образования отдельных слоев отложений на экранных поверхностях нагрева в зависимости от параметров, влияющих на вышесказанные факторы, а именно (при постоянном составе топлива):

1. теплонапряженность топочного объема;
2. коэффициент избытка воздуха;
3. тип горелки и условия выхода пылевоздушной смеси из нее;
4. температура экранных труб;
5. интенсивность излучения факела;
6. режимы очистки экранных труб.

В [24] описывается разработанный в ЦКТИ калориметр-пробоотборник для исследования процессов загрязнения топочных стен. Названный прибор использован В. Н. Головиным для исследования первоначальной стадии загрязнения экранных труб в котле ТП-17 [25]. Опыты показали, что коэффициент тепловой эффективности экранных труб в начальной стадии загрязнения в определенном интервале времени изменяется в очень широких пределах. При обработке опытных данных автору не удалось получить четких данных о влиянии отдельных параметров процесса (температура стенки, коэффициент избытка воздуха, интенсивность излучения факела и др.) на условия образования первоначального слоя отложе-

ний. Причиной этого, по-видимому, является принятая методика исследований, которая не позволяет плавно регулировать такой важный параметр, как температура поверхности и поддерживать ее постоянной в течение опыта. Возникают также некоторые затруднения при определении тепловосприятий калориметром-пробоотборником.

В Таллинском политехническом институте разработан охлаждаемый воздухом прибор, т. н. топочный калориметр, для исследований загрязнения экранных поверхностей нагрева. При использовании данного прибора можно провести опыты при постоянной температуре стенки в широком интервале падающих лучистых потоков. Опыты, проведенные в топке котла БКЗ 75—39 Ф, показали, что условия образования подслоя на экранных трубах сильно зависят от температуры металла, интенсивности излучения факела и коэффициента избытка воздуха. Начиная от определенной температуры стенки при данной интенсивности излучения факела и коэффициента избытка воздуха, скорость загрязнения поверхности нагрева резко увеличивается*).

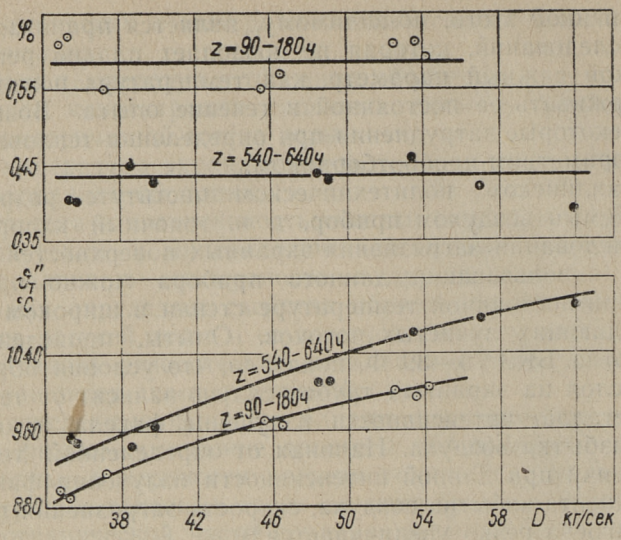
В Таллинском политехническом институте также разработана конструкция специальных вставок и методика измерений, позволяющие измерить процессы образования сдуваемых и несдуваемых отложений.

Влияние загрязнения экранных труб на теплообмен в топках

Тепловосприятие экранных поверхностей нагрева в камерных топках при сжигании твердых топлив в пылевидном состоянии существенно зависит от теплового сопротивления отложений, образовавшихся на экранных трубах. За счет теплового сопротивления отложений уменьшается тепловосприятие экранов и увеличивается температура газов на выходе из топки. В нормативном методе теплового расчета котельных агрегатов влияние теплового сопротивления отложений на условия теплообмена в топках учитывается условным коэффициентом загрязнения лучевоспринимающих поверхностей нагрева ζ [16]. При этом условный коэффициент загрязнения считается постоянным при сжигании данного вида топлива в конкретном топочном устройстве. Исследования, проведенные в Таллинском политехническом институте [12], показывают, что теплообмен в топках сланцевых котлов является нестационарным. Тепловое сопротивление отложений и коэффициент ζ зависят от времени.

---

* См. также стр. 55 настоящего сборника.



Фиг. 4. Зависимость условного коэффициента загрязнения лучевоспринимающих поверхностей и температуры газов на выходе из топки от паропроизводительности котла (котел ТП-17)

Выражаем условный коэффициент загрязнения лучевоспринимающих поверхностей нагрева в виде

$$\zeta = \zeta_0 \varkappa (\tau).$$

Коэффициент ζ_0 является условным коэффициентом загрязнения лучевоспринимающих поверхностей нагрева непосредственно после обдувки топки, т. е. учитывает тепловое сопротивление несдуваемого слоя отложений. Как показывают более детальные исследования, толщина несдуваемого слоя отложений со временем растет и коэффициент ζ_0 уменьшается. На фиг. 4 приведена зависимость коэффициента ζ_0 и температура газов на выходе из топки $\vartheta''_т$ от паропроизводительности котла и времени z, отсчитанного от момента пуска котла после механической очистки экранов топки. Фиг. 4 составлена на основе опытных данных, полученных при испытании котла ТП-17. Из этих данных выясняется, что в первом приближении можно считать, что коэффициент ζ_0 в данный момент времени от паропроизводительности котла не зависит.

Кроме времени z коэффициент ζ_0 зависит от параметров, характеризующих работу топки в интервале времени $o—z$ (усредненные параметры по времени).

Величина $\varkappa$ (τ) учитывает влияние теплового сопротивления сдуваемого слоя отложений на теплообмен в топке, зависящего главным образом от толщины сдуваемого слоя, который растет со временем между двумя обдувками топки. Отсчитывая время τ от момента окончания обдувки топки, имеем, что при $\tau = 0$, $\varkappa(\tau) = 1$. Так же как ζ_0, $\varkappa$ (τ) кроме времени τ зависит еще от факторов, которые определяют скорость роста сдуваемых отложений.

Нестационарность теплообмена в топке влияет также на тепловосприятие в пароперегревателе и в хвостовых поверхностях нагрева котла. Как показывают опыты, со временем z температура уходящих газов увеличивается, а к.п.д. котла уменьшается.

Поскольку тепловосприятие топки, пароперегревателя и других поверхностей нагрева за счет непрерывного роста несдуваемого слоя отложений уменьшается, то при проектировании сланцевых котлов необходимо исходить из определенного периода эксплуатации z_0 и на основе этого определить коэффициенты, характеризующие степени загрязнения отдельных поверхностей нагрева. Если $z > z_0$ (при определенной нагрузке котла), то котел не способен работать с номинальной нагрузкой и параметрами пара, определяемые условием $z = z_0$.

ЛИТЕРАТУРА

1. И. П. Эпик. Влияние минеральной части сланцев на условия работы котлоагрегата. Эстгосиздат, Таллин, 1961.
2. Mechanism Corrosion and Fuel Impurities. London, Butterworths, 1963.
3. W. Gums, H. Kirsch und M. T. Mackowsky. Schlackenkunde. Berlin-Göttingen-Heidelberg, 1958.
4. P. H. Crumley, A. W. Fletcher and D. S. Wilson. The formation of banded deposits in pulverized — fuelefired boilers. «Journ. Ins. Fuel», Nr. 170, 1955.
5. D. Logie and J. E. Rayńer. Determination of Alkalies in Coal and Coal Ash. «Journ. Ins. Fuel», Nr. 152, 1953.
6. Н. Л. Дилакторский и Е. А. Галибина. К вопросу о процессах минералообразования, протекающих при нагревании сланцевой золы и твердении гидратированных продуктов обжига. «Сланцезольные материалы в строительстве», Труды второго совещания по расширению использования в строительстве неорганической части сланца-кукерсита. Таллин, 1955.
7. Н. Л. Дилакторский. Теоретические основы использования минеральной составляющей горючих сланцев в производстве строительных материалов. Исследования по строительству III. Таллин, 1962.
8. И. П. Эпик и Х. П. Тааль. Исследование улетучивания компонентов сланцевой золы в восстановительной среде при высоких температурах. Известия вузов «Энергетика», № 6, 1964.
9. Х. П. Тааль. Улетучивание соединений щелочных металлов минеральной части горючих сланцев. Известия вузов «Энергетика», № 10, 1964.

10. И. П. Эпик и А. А. Отс. О коэффициенте загрязнения топки при пылевидном сжигании сланцев. Известия вузов «Энергетика», № 8, 1962.
11. И. П. Эпик и А. А. Отс. Распределение интенсивности излучения факела по высоте топочных стен. «Теплоэнергетика», № 3, 1963.
12. А. А. Отс. Тепловое сопротивление отложений на экранных трубах. Труды Таллинского политехнического института, серия А, № 206, 1963.
13. А. А. Отс. Баланс серы при сжигании эстонских горючих сланцев. Труды Таллинского политехнического института, серия А, № 226, 1965.
14. В. В. Митор. Теплообмен в топках паровых котлов. Москва, 1963.
15. Р. С. Прасолов. Массо- и теплоперенос в топочных устройствах. Издат. «Энергия», 1964.
16. Тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод). Госэнергоиздат, 1957.
17. В. Х. Кикас. Вяжущие из золы сланца-кукерсита. Труды Таллинского политехнического института, серия А, № 166, 1959.
18. Э. Ю. Пиксарв. О минералогическом составе циклонной золы пылевидного сжигания сланца-кукерсита и ее фракций. Труды Таллинского политехнического института, серия А, № 166, 1959.
19. Э. Ю. Пиксарв. О щелочных соединениях в циклонной зоне. Труды Таллинского политехнического института, серия А, № 166, 1959.
20. Х. Я. Мяндметс. Основные факторы, определяющие вяжущие свойства золы горючего сланца-кукерсита. Исследования по строительству II, Таллин, 1961.
21. Х. Х. Арро, А. Я. Махлапуу и А. Х. Рейер. Физико-химические характеристики отложений на поперечно-обтекаемых ширмах пароперегревателя при сжигании эстонских сланцев. Труды Таллинского политехнического института, серия А, № 209, 1963.
22. K. Wickert. Voraussage von untererchiedlichen Rohrverschmutzungen durch die zu verfeuernden Kohlen. Energie Nr. 7, 1958.
23. C. H. Anderson and E. K. Diehl. Banded Fierside Deposits on Coal-fired Boilers. Amer. Soc. mech. Engrs. Paper Nr. 55-A-200.
24. А. М. Гурвич и Р. С. Прасолов. Некоторые свойства золовых отложений на экранных трубах топок паровых котлов. Теплоэнергетика № 7, 1960.
25. В. Н. Головин. Результаты исследования загрязнения экранов котла ТП-17 при сжигании прибалтийских сланцев. Энергомашиностроение, № 6, 1964.
26. В. Н. Головин. К вопросу о загрязнении экранов паровых котлов. «Теплоэнергетика», № 4, 1965.

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА
СЕРИЯ А № 240 1966

УДК 662.67:536.422.1.001.5

Х. П. Тааль, А. Я. Махлапуу, И. П. Эпик

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И СРЕДЫ НА УЛЕТУЧИВАНИЕ СОЕДИНЕНИЙ КАЛИЯ ИЗ ЗОЛЫ ЭСТОНСКИХ ГОРЮЧИХ СЛАНЦЕВ

Загрязнение поверхностей нагрева котлоагрегата плотными связанными отложениями летучей золы зависит в значительной мере от поведения минеральной части топлива в топочном процессе. Некоторые минеральные компоненты испаряются или сублимируются при высоких температурах в топке. Эти пары конденсируются частично из дымовых газов на более холодных поверхностях нагрева или на ранее образовавшихся отложениях, связывая твердые частицы летучей золы и увеличивая плотность отложений. Другая часть этих паров, по ходу охлаждения дымовых газов, превращается в аэрозоли. По мнению многих авторов могут и аэрозоли, вследствие их очень маленьких размеров, служить связывающим веществом для более крупных твердых частиц летучей золы и шлака.

Особенно интенсивно происходит загрязнение поверхностей нагрева тех котлов, в топках которых сжигаются топлива, содержащие в значительных количествах соединения щелочных металлов и хлора. К подобным топливам относятся и эстонские горючие сланцы. Они отличаются от других подобных твердых топлив высоким содержанием кальция, а также в отношении преобладания калия над натрием. В пересчете на окислы содержание калия до 12 раз больше, чем натрия. Установлено также преимущественное скопление кальция и калия в плотных связанных отложениях летучей золы [1, 2].

Калий находится в эстонских горючих сланцах, в основном, в составе полевых шпатов и слюд. Эти минералы разлагаются в топке термически, а также в результате химических реакций с другими минеральными компонентами сланцев. Продукты разложения частично улетучиваются.

Минералы топлива и продукты их разложения вступают в химические реакции также с газовой средой, окружающей их в топке. Установлено, например, что водяной пар повышает давление пара хлористого натрия [3]. Улетучивание калия из иллита, содержащегося в сырьевой смеси цемента, оказалось значительно большим в случае, когда к имитированным сухим печным газам примешивали водяные пары, и более меньшим в случае, когда к газам примешивали двуокись серы. В первом случае, вероятно, образовалась и улетучивалась гидроокись калия, давление пара которой значительно выше, чем сульфата калия, образовавшегося в результате химической реакции с двуокисью серы [4]. При нагревании золы бурого угля с высоким содержанием солей натрия в среде светильного газа отмечалось особенно большое испарение (потеря в весе) по сравнению с нагреванием на воздухе [5]. При нагревании золы эстонских горючих сланцев в печи Таммана, т. е. в сильно восстановительной среде, оказалось, что скорость улетучивания соединений калия из золы во много раз больше, чем при нагревании той же золы на воздухе [6]. Но последние результаты трудно сравниваемые, так как они получены при нагревании золы в отличающихся условиях диффузии.

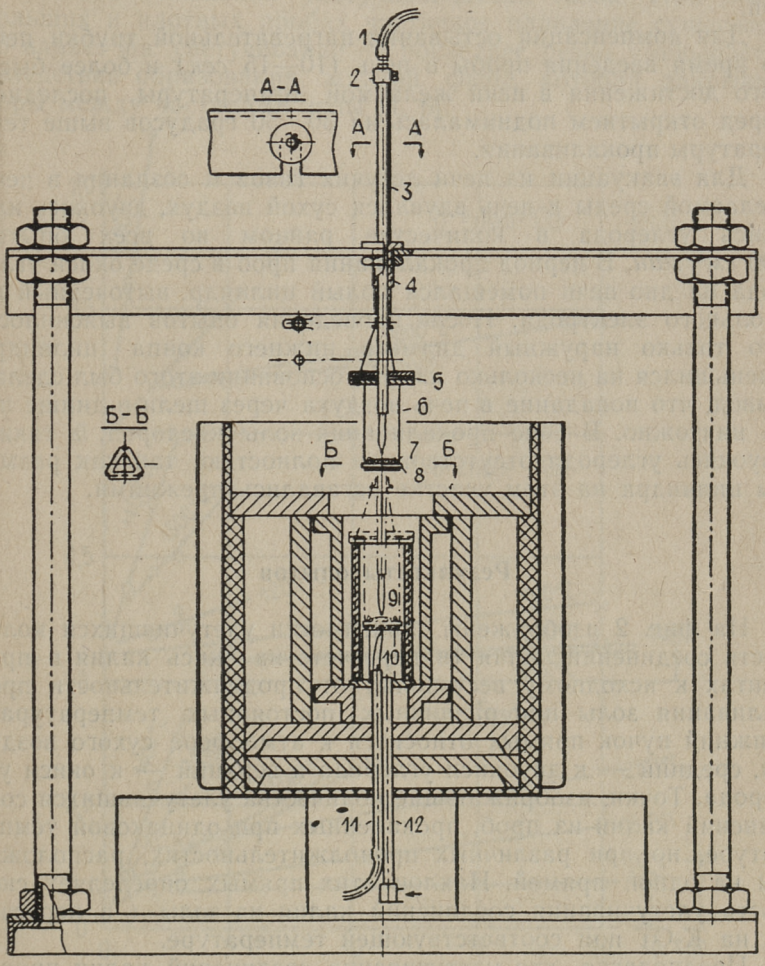
Ниже представлены результаты лабораторных исследований о влиянии температуры и среды (воздух, CO и CO_2) на скорости улетучивания соединений калия, содержащихся в золе эстонских горючих сланцев. Исследования проведены в пределах температур 1000—1400°C.

О методике работы

Для исследований использовалась зола, полученная путем озоления при 800°C пробы из керна буровой скважины сланцевой пачки из района Вийвиконд (Эстонская ССР). Химический состав золы был следующим: 20,2% SiO_2, 3,6% Fe_2O_3, 6,0% Al_2O_3, 54,8% CaO, 7,8% MgO, 1,96% K_2O, 0,40% Na_2O, 4,72% SO_3, 0,0019% S^{2-}, 0,30% $S_к$ и 0,12% Cl.

Три пробы золы, из которых состоялся один цикл опытов, нагревали в виде тонкого насыпного слоя при той же температуре, но с различной продолжительностью. Количество соединений калия, улетучивавшиеся в течение нагревания, в пересчете на окиси калия, вычисляли по содержанию калия в исходной золе и в остатках прокаленной золы. Для того, чтобы улетучивалась только ограниченная часть соединений калия (меньше 50%) и убывание их в золе существенно не уменьшило бы скорости улетучивания, применяли, в общем, короткие продолжительности нагревания — от 1 до 60 минут.

Зависимость улетучившихся количеств соединений калия от продолжительности нагревания оказалась в тех случаях линейной. По этой зависимости определили скорости улетучивания соединений калия в процентах улетучивавшейся за минуту нагревания окиси калия к исходному весу золы.



Фиг. 1. Печь для нагревания золы:

1 — верхняя термопара, *2* — установочное кольцо, *3* — опора, *4* — направляющая втулка, *5* — крышка, *6* — подвесок, *7* — пластинка с пробой, *8* — керамическая основа, *9* — нагревательная трубка ⌀ 25×83 *мм*, *10* — цилиндр из углерода, *11* — нижняя термопара, 12 — трубка для подвода газа

Нагревание золы проводилось в вертикальной керамической трубчатой печи с обмоткой из платиновой проволоки, представленной на фиг. 1. Пробы золы весом 0,10—0,16 *г*, помещенные в виде насыпного слоя толщиной 2—3 *мм* на тонкую платиновую пластинку (20×20×0,2 *мм*) и имеющие плотность 0,2 *г/см*^{3}, впускали в подогретую печь в месте верхней термопары. В то же время закрывалась печь крышкой.

Для компенсации остывания нагревательной трубки печи во время введения пробы в печь (10—15 *сек*) и более быстрого достижения в печи желаемой температуры, последняя перед открытием поднималась на 30—50 градусов выше температуры прокаливания.

Для эвакуации из печи летучих газов и создания в печи желаемой среды в печь вдувался сухой воздух, двуокись или окись углерода в количестве равном во всех опытах 100 *см*^{3}*/мин*. В период прокаливания проб в среде окиси углерода на дно печи помещался полый цилиндр, выточенный из угольного электрода. После проведения опытов выяснилось, что только наружный диаметр нижнего конца цилиндра уменьшился на несколько *мм*. На основании этого был сделан вывод, что попадание в печь воздуха через щели в днище печи ничтожно. В зоне прокаливания золы кислород, а также двуокись углерода отсутствовали полностью, так как размеры цилиндра на этом участке оставались прежними.

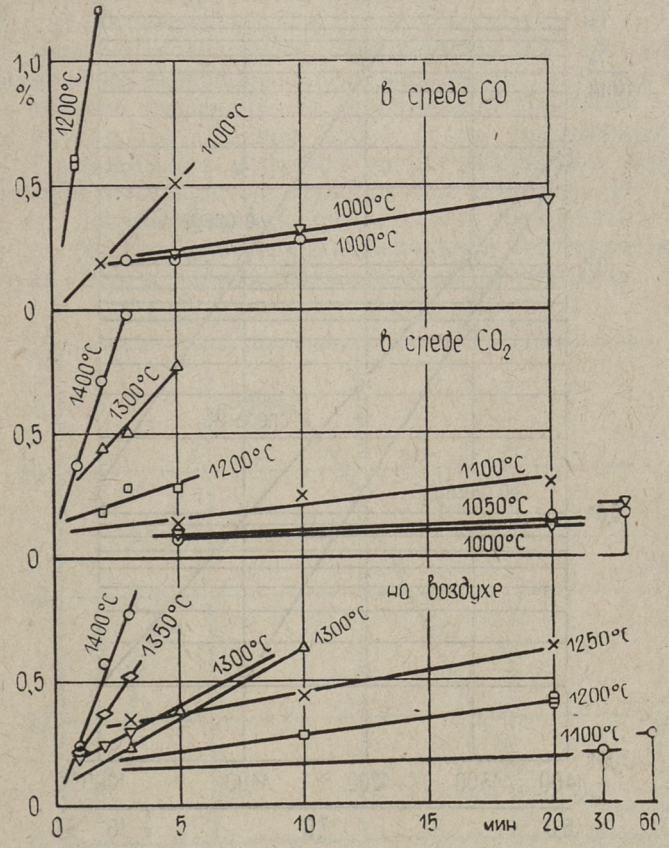
Результаты опытов

На фиг. 2 изображены зависимости улетучившихся количеств соединений калия (в пересчете на окись калия в процентах к исходному весу золы) от продолжительности прокаливания золы при различных постоянных температурах. Нижний пучок прямых относится к атмосфере сухого воздуха, средний — к двуокиси углерода и верхний — к окиси углерода. Точки, изображающие количества улетучившихся соединений калия из проб, прокаленных при одинаковой температуре, но при различных продолжительностях, расположены на одной прямой. Наклон этих прямых определяет скорость улетучивания соединений калия из золы (в пересчете на K_2O) при соответствующей температуре.

Предполагая, что улетучивание соединений калия происходит путем испарения, можно ожидать, что скорости улетучивания зависят от температуры аналогично упругости пара. На фиг. 3 изображены в полулогарифмических координатах зависимости скорости улетучивания от обратной величины

абсолютной температуры нагревания золы в указанных средах.

Из фиг. 3 видно, что точки, изображающие скорости улетучивания калия, находятся на соответствующих прямых. Этот результат указывает на то, что спекание и частичное плавление золы при нагревании тонкого пористо-рыхлого слоя не увеличивает существенно диффузионное сопротивление слоя в отношении улетучивающихся газов. При более больших и плотных пробах частичное плавление существенно влияет на улетучивание — последнее резко уменьшается вследствие образования жидкой фазы, которая закрывает поры между частицами золы [4, 6].

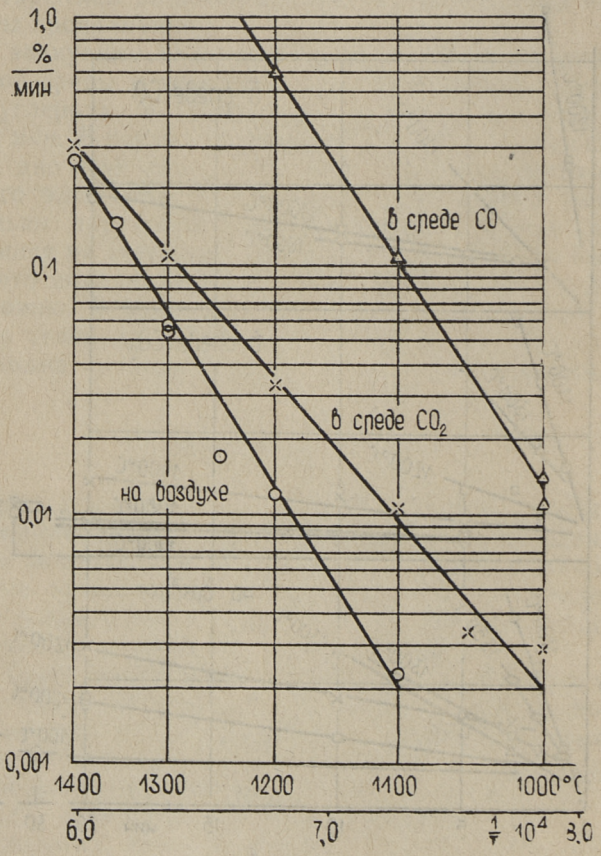


Фиг. 2. Улетучивание соединений калия, в процентах от исходного веса золы, в зависимости от продолжительности нагрева при различных температурах. Полное улетучивание калия имеет место при величине 1,96%

Из фиг. 3 вытекает:

1. При нагревании сланцевой золы в пределах температур от 1000 до 1400°С повышение температуры на 100 градусов увеличивает в 4—6 раз скорость улетучивания соединений калия из сланцевой золы, как в воздушной среде, так и в среде окиси углерода и в 3—5 раз в среде двуокиси углерода.

2. Соединения калия, содержащиеся в минеральной части сланца, улетучиваются в среде окиси углерода при той же температуре в 50 раз быстрее, чем в воздушной среде.



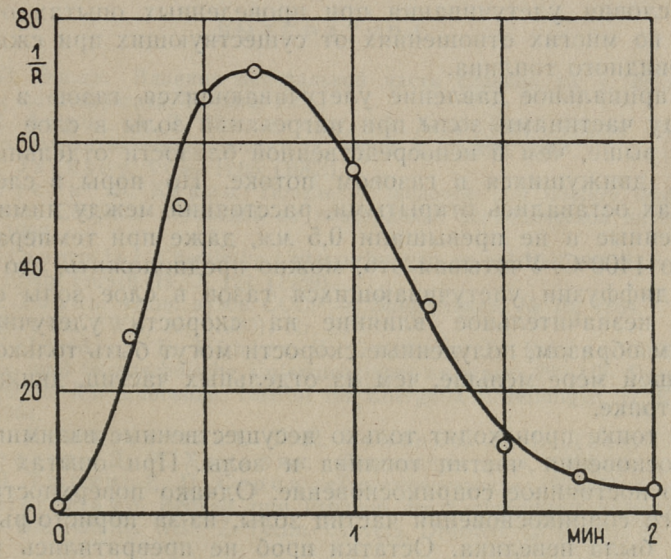
Фиг. 3. Зависимость логарифмов скоростей улетучивания соединений калия (K_2O) от обратных величин абсолютной температуры при нагревании золы в различных средах

3. В средах окиси углерода и воздуха наблюдаются равные скорости улетучивания соединений калия при разнице в температурах на 200—250 *град*.

4. Скорости улетучивания соединения калия в среде двуокиси углерода до 5 раз выше, чем в воздушной среде и увеличиваются с повышением температуры медленнее, чем в воздушной среде.

Причины значительно более быстрого улетучивания соединений калия в среде окиси углерода не ясны. По-видимому, окись углерода нарушает кристаллическую решетку тех минералов, которые содержат калий и кислород. Отнятие атомов кислорода от кристаллической решетки освобождает от связей и атомы калия.

Для выяснения существа улетучивающихся газов определили изменение электрической проводимости газов над слоем золы в течение нагревания ее при температуре 1300°С в среде окиси углерода. Данные этого опыта представлены на фиг. 4. Проводимость в пустой печи, вызванная, вероятно, термической эмиссией электронов, была невелика. Из фиг. 4 видно, что после впускания пробы в печь увеличивалась проводимость быстро, достигая максимальной величины за 30—40 секунд. Это же время, согласно фиг. 3, учитывая, что со-



Фиг. 4. Зависимость электрической проводимости газов над слоем золы от продолжительности нагревания при 1300°С в среде окиси углерода.

держание K_2O в исходной золе 1,96%, требуется для полного улетучивания калия. Имея в виду, что кроме калия в исследуемой золе мало других улетучивающихся веществ (окиси натрия 0,40%, хлора 0,12%), можно предположить, что электропроводимость над слоем золы обусловлена главным образом улетучиванием калия в ионизированном виде.

Обсуждение результатов

Неконтролируемым фактором, влияющим на улетучивание, оказалась температура золы во время первых секунд нагревания. Но судя по результатам опытов кажется, что в начальном периоде нагревания, пока верхняя термопара, по которой измеряли температуру золы, еще нагревалась, температура в печи была даже выше, чем желаемая температура нагревания. Температура в печи перед ее открытием была отрегулирована на 30—50 *град* выше желаемой. Вследствие этого происходило, по-видимому, дополнительное улетучивание соединений калия при всех опытах, в результате чего прямые на фиг. 2 оказались выше ожидаемых и имеют начальные ординаты. Но эти ошибки одинаковы при всех трех нагреваниях одного цикла опытов и не повлияли на наклоны прямых, по которым определяли скорости улетучивания.

Условия улетучивания при проведенных опытах отличались во многих отношениях от существующих при сжигании пылевидного топлива.

Парциальное давление улетучивающихся газов в порах между частицами золы при нагревании золы в слое может быть выше, чем в непосредственной близости отдельных частиц, движущихся в газовом потоке. Но поры в слое при опытах оставались открытыми, расстояния между ними были умеренные и не превышали 0,5 *мм,* даже при температурах около 1400°С. Учитывая это, можно предположить, что влияние диффузии улетучивающихся газов в слое золы оказывало незначительное влияние на скорость улетучивания. Таким образом, полученные скорости могут быть только в небольшой мере меньше, чем из отдельных частиц, движущихся в топке.

В топке происходят только несущественные взаимные соприкосновения частиц топлива и золы. При опытах имело место постоянное соприкосновение. Однако поверхность взаимного соприкосновения частиц золы, из-за пористо-рыхлого слоя, была невелика. Остатки проб не превратились в расплавленный сгусток, а состояли из гроздей отдельных округлившихся частиц различной окраски и прозрачности. Из этого можно судить, что химические реакции между частицами

золы происходили во время нагревания только в умеренной степени.

Следует отметить, что при испытании варьировали только продолжительностью и температурой нагреваний, а также атмосферой в печи. Другие факторы, влияющие на улетучивание, как-то количество золы, толщина слоя, его форма, плотность и т. п. были во всех опытах одинаковы.

Известно, что во многих случаях уменьшали загрязнение поверхностей нагрева увеличением избытка воздуха [3, 7, 8, 9] или регулированием работы горелок и аэродинамики факела [9, 10, 11]. Установлено также повышенное шлакование при уменьшении избытка воздуха при испытании котла ТП-17, работающего на эстонских горючих сланцах.*

Влияние нехватки воздуха связывается обычно с обрзованием в частицах летучей золы закиси железа и сульфидов, которые понижают температуры спекания и налипания частиц летучей золы на поверхностях нагрева [11]. Результаты данной работы показывают, что во многих случаях причиной повышенного загрязнения при условиях нехватки воздуха может являться интенсивное улетучивание калия из минеральной части топлива. Аналогичное положение может быть вызвана и соединениями натрия.

ЛИТЕРАТУРА

1. И. П. Эпик. Влияние минеральной части сланцев на условия работы котлоагрегата. Таллин, 1961.
2. Х. Х. Арро, А. Я. Махлапуу, А. Х. Рейер. Труды Таллинского политехнического института, серия А, № 209, 1963.
3. P. J. Jackson. VGB, H.85 (1963).
4. К. Гус и Ф. Кейль. Поведение щелочей при обжиге цемента. Цемент. Сборник переводов из иностранной периодической литературы, 1962.
5. C. Staemmler. Chemische Untersuchungen an salzhaltigen Braunkohlen. Freib. Forsch. H., A 124 (1959).
6. Х. П. Тааль. «Изв. вузов СССР — Энергетика», № 10, 1964.
7. R. Quack. BWK, 15, (1963), Nr. 8.
8. K. Schindler, E. Köhler, B. Gartner, B. Köppe. Aufbereitungs- und feuertechnische Untersuchungen an einem 220 t/h- Dampferzeuger im KW Lübbenau. Institut für Energetik-Mitteilungen, H. 63, 64, 65, 1964.
9. В. А. Крыжановский, Г. Н. Чаленко, Л. В. Деев, А. П. Ковалев, Д. М. Хзмалян. «Теплоэнергетика», 1964, № 4.
10. П. Я. Тюрин, Е. П. Серов. «Теплоэнергетика», 1964, № 1.
11. W. Herrmann. Beitrag zum Problem der Verbrennung ascheschwieriger Brennstoffe. Wiss. Z. Techn. Univers. Dresden, 12 (1963), H. 4.

* Результаты наладочных испытаний ОРГРЭС.

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА
СЕРИЯ А № 240 1966

УДК 621. 182. 9. 001. 5+536. 2. 083

В. А. Сельг

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ СТЕНКИ ЭКРАННЫХ ТРУБ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ЗАГРЯЗНЕНИЯ В ТОПКАХ, СЖИГАЮЩИХ СЛАНЦЕВУЮ ПЫЛЬ

Основным препятствием при создании котлоагрегатов, соответствующих требованиям современной теплоэнергетики, является до сих пор не решенная проблема загрязнения поверхностей нагрева. При сжигании в котлоагрегате сланцев или другого богатого минеральными примесями топлива наблюдается кроме загрязнения пароперегревателя еще и интенсивное загрязнение экранных поверхностей топки. В связи со все возрастающими удельными нагрузками и параметрами пара, проблема загрязнения топки продолжает обостряться.

В соответствующих исследовательских работах большое внимание уделяется изучению условий возникновения загрязнений и вопросу механизма образования отложений, знание которых является предпосылкой для действенной борьбы с загрязнениями и при повышении экономичности эксплуатации котельных агрегатов. Общим мнением является то обстоятельство, что проблема загрязнения имеет комплексный характер, зависящий одновременно от многих факторов и требует в исследовательских работах многостороннего изучения [1, 2]. К кругу вопросов, тесно связанных с проблемой загрязнения, относится, например, наружная коррозия поверхностей нагрева, теплопередача и термическое сопротивление слоя загрязнений, методы очистки топочных поверхностей, подготовка топлива (помол, использование присадок), выбор режима горения, аэродинамическое оформление котлоагрегата, выбор параметров пара и т. д. Всеми этими вопросами занимаются во многих странах.

Факторы, вызывающие загрязнения

Характер загрязнений в топке могут определить в основном следующие факторы:

1) температурное поле в камере топки,
2) температура стенки поверхности экрана,

3) теплотехнические, химические, минералогические и фракционные свойства топлива,

4) аэродинамика топки и горелок,

5) параметры процесса горения (коэффициент избытка воздуха, распределение воздуха в горелках, температура горячего воздуха и т. д.).

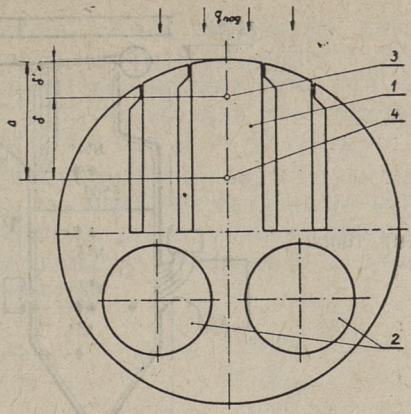
Из них важнейшими являются температурные условия, определяющие способность золовых частиц цепляться на поверхности нагрева. Аэродинамика топки влияет на температурное поле, на поле концентрации и на массообмен между пыльным топочным газом и поверхностями экранов и тем самым вызывает часто локальное шлакование и загрязнение.

Как показывают наблюдения, до поверхности экрана доходит значительно больше золовых частиц, чем их там в действительности оседается. И только тогда, когда поверхность трубы с течением времени покрывается легко цепляющимися золовыми частицами, т. н. «подслоем» [1], начинается интенсивное оседание золовых частиц.

Для объяснения нужно сказать, что загрязнением считается в данном случае все то, что находится на трубе поверхности нагрева и не является исходным материалом трубы — сталью. Следовательно, и оксиды на поверхности трубы рассматриваются как загрязнение. Такой подход к вопросу оправдан следующими обстоятельствами: во-первых, возникновение и развитие оксидов происходит под влиянием топочных газов и оседающих частиц, и во-вторых, оксидный слой способствует сцеплению подслоя за поверхность трубы [3]. А под интенсивностью загрязнения понимается скорость изменения тепловосприятия топочных экранов, что равноценно со скоростью изменения термического сопротивления слоя загрязнения.

Экспериментальное определение интенсивности загрязнения и температуры возникновения подслоя

Для того, чтобы исследовать условия загрязнения в зависимости от температуры стенки экранных труб, был сконструирован специальный топочный калориметр-пробоотборник, работающий по принципу теплопроводности. Конструкцию топочного калориметра объясняет фиг. 1, где изображен разрез одного из первых вариантов калориметра. В измерительное ребро калориметра (*1*) помещены на разные расстояния от наружной поверхности две термопары (*3*) и (*4*). Воспринимаемый калориметром тепловой поток $q_{\text{воспр}}$ передается при помощи каналов (*2*) сжатому воздуху, количество которого, и тем самым и охлаждающее действие регулируется автомати-



Фиг. 1. Поперечный разрез одного варианта топочного калориметра:

1 — измерительное ребро, *2* — воздушный канал, *3* — термопара, *4* — термопара

ческим регулятором, поддерживая на наружной поверхности измерительного ребра постоянную температуру. Лучшие варианты созданных топочных калориметров способны поддерживать постоянную (с точностью $\pm 3\%$) температуру наружной поверхности $t_{ст}$ начиная с 250°С и выше при относительно высоких величинах падающего теплового потока ($q_{пад}$ до 300 *Мкал/м².час*).

Воспринимаемый калориметром тепловой поток $q_{воспр}$ определялся из разницы показаний термопар t_1 и t_2 (на фиг. 1 соответственно (*3*) и (*4*)) через сомножитель калориметра K:

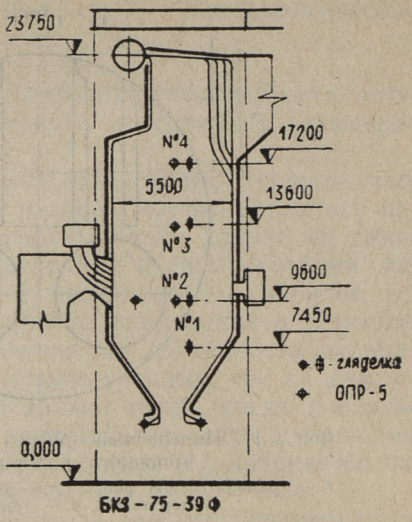
$$q_{воспр} = K\,(t_1 - t_2). \qquad (1)$$

Сомножитель K вычисляется для каждого показания калориметра как отношение среднего коэффициента теплопроводности $\lambda_{ср}$ на промежуток термопаров δ (см. фиг. 1).

$$K = \frac{\lambda_{ср}}{\delta}, \qquad (2)$$

При определении коэффициента теплопроводности $\lambda_{ср}$ средней температурой $t_{ср}$ взято арифметическое среднее показание термопаров измерительного ребра в данном измерении и соответственно в [4] приведенными формулами рассчитывается средняя теплопроводность для материала калориметра (сталь 20) по следующему выражению

$$\lambda_{ср} = 2{,}67\,(635 - t_{ср}) \cdot 10^{-2} + 28{,}8\ ккал/м \cdot час \cdot град. \qquad (3)$$



Фиг. 2. Схема топки БКЗ 75-39Ф

Опыты проводились в ТЭЦ Кохтла-Ярве, в топке котла БКЗ-75-39 $Ф_{сл}$. На экранах названного котла образуются загрязнения летучей золы, не связанные с оксидными подслоями (температура стенки экранных труб $t_{ст}$ около 270°С), поэтому экраны легко очищаются обдувочными аппаратами ОПР-5 и работу топки характеризует большая стабильность. Опытами старались при помощи топочных калориметров имитировать условия работы стенки экранных труб в интенсивно загрязняющейся топке котлов ТП-17 ($t_{ст}$ около 340°С), поддерживая для этого температуру наружной поверхности в плоскости экранов положенного топочного калориметра на разных постоянных уровнях (в диапазоне от 300 до 470°С) и проводя опыты на разных тепловых нагрузках. Опыты осуществлялись из трех, находящихся на разных высотах топки, гляделок (гляделки №№ 2—4 на фиг. 2), на двух разных нагрузках котла (паропроизводительностью 45 и 65 *т/ч*), чем добивались изменения интенсивности падающего теплового потока $q_{пад}$ в пределах от 90 до 250 *Мкал/м².ч*. Для определения $q_{пад}$ пользовались радиометрами уменьшенных размеров (варианты конструкций Внукова), принцип работы и формулы расчета которых не отличаются от ранее использованных [5].

Чтобы предотвратить возможное появление локальных зон с редуцирующей средой, где интенсивное улетучивание соединений щелочных металлов может исказить ход загрязне-

ния [6], во время опытов воздушный режим горения поддерживался такой, чтобы коэффициент избытка воздуха перед пароперегревателем не стал ниже 1,25. Средняя величина коэффициента избытка воздуха при нагрузке котла $D = 65$ *т/ч* была $\alpha_т = 1{,}28$ и при $D = 45$ *т/ч* $\alpha_т = 1{,}60$.

Тепловая работа топочных экранов часто характеризуется коэффициентом тепловой эффективности ψ [7, 8], который по содержанию является отношением воспринятого экраном тепла к теплу, падающему на экран. В данном случае, для топочного калориметра

$$\psi_к = \frac{q_{воспр}}{\varepsilon_р \cdot q_{пад}}, \qquad (4),$$

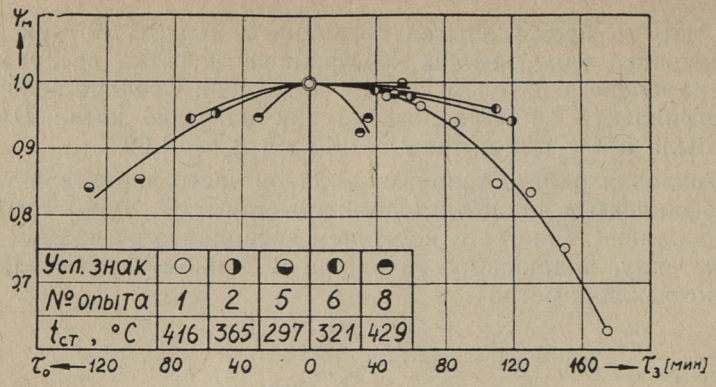
где $q_{воспр}$ определяется формулой (1) и делителем является показание радиометра. Единственным неизвестным в формуле (4) является степень черноты рабочей поверхности радиометра $\varepsilon_р$, которую можно для вработавшейся поверхности радиометра считать величиной постоянной для всего периода испытаний.

Чтобы нейтрализовать ошибки при определении сомножителя калориметра K и искажения температурного напора в калориметре, вызванные возможными паразитными тепловыми потоками, а также для того, чтобы освободиться от неизвестной степени черноты радиометра, для каждой серии испытаний была найдена максимальная величина коэффициента тепловой эффективности $\psi_{к_{макс}}$, с которой все опытные данные данной серии испытаний были разделены:

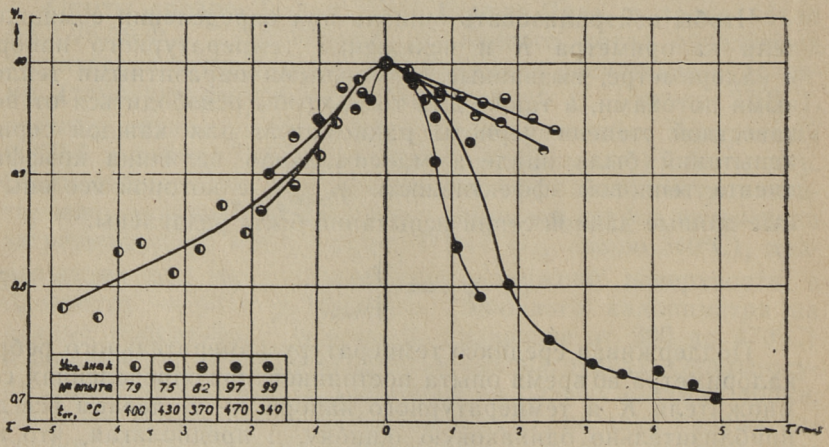
$$\psi_м = \frac{\psi_к}{\psi_{к_{макс}}}. \qquad (5)$$

Поддерживая среднюю температуру измерительного ребра калориметра во время опыта постоянной, при определениях сомножителя K и температурного напора $t_1 — t_2$ делаем всегда приблизительно одинаковую ошибку, и предполагая, что во время испытаний степень черноты радиометра не изменяется, по формуле (5) сократятся все вышеупомянутые возможные ошибки эксперимента.

Полученный т. н. приведенный коэффициент использования $\psi_м$ в течение данного опыта характеризует изменение со временем количества воспринимаемой калориметром теплоты при постоянном падающем потоке $q_{пад}$ и при постоянной температуре наружной поверхности калориметра $t_{ст}$ (фиг. 3, 4, 5). Чтобы лучше сравнивать между собой различные опы-

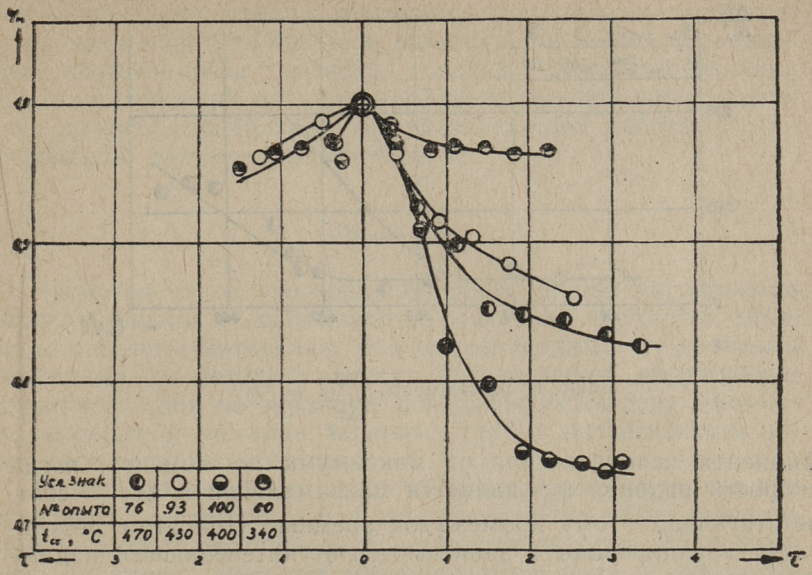


Фиг. 3. Зависимость $\psi_м = f(\tau_з)$. Падающий тепловой поток $\varepsilon_р \cdot q_{пад} \sim 240$ *Мкал/м². ч.* Гляделка №2. Продолжительность опытов 3 часа



Фиг. 4. Зависимость $\psi_м = f(\tau_з)$. Падающий тепловой поток $\varepsilon_р \cdot q_{пад} \sim 190$ *Мкал/м². ч.* Гляделка № 2. Продолжительность опытов 5 часов

ты, начало осей времени выбрано на месте максимума приведенного коэффициента использования. Время от начала направо считают временем загрязнения топочного калориметра $\tau_з$, по которому определяют также интенсивность загрязнений. Время от начала налево считают временем вра-

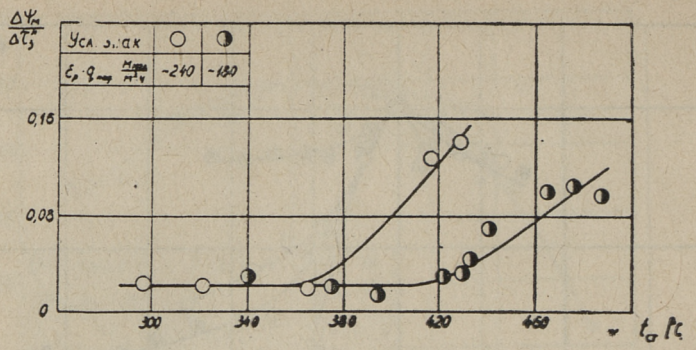


Фиг. 5. Зависимость $\psi_м = f(\tau_з)$. Падающий тепловой поток от 160 (опыты 76 и 80) до 220 (опыты 93 и 100) *Мкал/м². ч.* Гляделка № 3. Продолжительность опытов 5 часов

батывания поверхности калориметра τ_0 и для упрощения его отсчитывают в обратную сторону от действительного направления течения времени.

Так как поверхность калориметра перед опытом была очищена шкуркой до металлического блеска, ее степень черноты (= поглощающая способность) была низкая. Поэтому все кривые приведенного коэффициента использования $\psi_м$ в начальный период опыта имели тенденцию повышения до максимума, когда по всей вероятности степень черноты поверхности уже стабилизировалась, и дальнейшее падение кривой происходило от повышения температуры поверхности загрязнения и тем самым собственного излучения калориметра, вызванного ростом термического сопротивления слоя загрязнения.

Поскольку скорость уменьшения приведенного коэффициента использования характеризует интенсивность загрязнения, на основе полученных кривых $\psi_м$ (фиг. 3, 4, 5) была составленая зависимость $\frac{\Delta\psi_м}{\Delta\tau_з} = f(t_{ст})$ (фиг. 6), где $\Delta\psi_м$ в первом приближении была взята как падение приведенного коэф-



Фиг. 6. Зависимость $\frac{\Delta\psi_м}{\Delta\tau_з} = f(t_{ст})$

фициента использования от максимума до момента, когда скорость падения $\psi_м$ является максимальной и $\Delta\tau_з$ — соответствующий этому промежуток времени. При этом результаты сгруппированы в зависимости от интенсивности падающего теплового излучения (фиг. 6). Как видно из приведенной зависимости, имеется ясно выраженная зависимость между интенсивностью загрязнения и температурой стенки. В условиях проведения наших опытов (в топке котлоагрегата БКЗ-75-39 Ф) интенсивное загрязнение поверхностей нагрева начинается при интенсивности падающего теплового потока $\varepsilon_р \cdot q_{пад} = 240$ *Мкал/м².час* при температуре стенки $t_{ст} = 340—380°C$ и при $\varepsilon_р \cdot q_{пад} = 170—200$ *Мкал/м². час* при температуре стенки $t_{ст} = 380—420°C$. Причем при увеличении падающего теплового потока интенсивность загрязнения растет и критическая температура стенки понижается.

Для того, чтобы проверить, насколько обосновано применение при опытах сравнительно высокого коэффициента избытка воздуха (чтобы избежать случайных искажений при процессе загрязнения), произвели контрольные опыты при пониженном коэффициенте избытка воздуха ($\alpha_т = 1{,}16$), из которых выяснилось, что при остальных равных условиях интенсивность загрязнения заметно повысилась. Кривые, характеризующие контрольные опыты, приведены и на фиг. 4 и 5 (соответственно опыты 99 и 100), откуда видно, что интенсивность загрязнения увеличилась более чем в 2 раза.

Поскольку уменьшение коэффициента избытка воздуха ухудшает нормальную работу промышленного котла, поэтому проведение опытов в этом направлении не входило в программу настоящей работы. Но проведенные контрольные

опыты показали, что во избежание загрязнения котлоагрегатов надо обратить большое внимание на выбор оптимального коэффициента избытка воздуха. Изучение влияния среды и нахождение оптимального коэффициента избытка воздуха требует специальной исследовательской работы в оборудованной для этого опытной топке.

Выводы

Несмотря на то, что представленные данные не являются окончательными и основываются только на частичной обработке опытного материала, можно подтвердить, что важными факторами, от которых зависит интенсивность образования первичного слоя на экранных поверхностях нагрева, являются температура металла экранных труб и интенсивность падающего теплового потока.

В свете приведенного выше можно предположить, что при скреплении частиц золы большое значение имеет их температура в момент достижения поверхности нагрева. На последнюю же влияет характер температурного поля и зависящий от температуры стенки поверхности нагрева термический пограничный слой в непосредственной близости от экранных труб.

ЛИТЕРАТУРА

1. И. П. Эпик. Влияние минеральной части сланцев на условия работы котлоагрегата. Таллин, 1961.
2. Р. С. Прасолов. Массо- и теплоперенос в топочных устройствах. Из-во «Энергия» 1964.
3. Топки. Загрязнение поверхностей нагрева. Энергетика за рубежом. Госэнергоиздат, 1957.
4. Р. Е. Кржижановский. «Теплоэнергетика» № 1, 1958.
5. И. П. Эпик, А. А. Отс. Известия АН ЭССР, серия техн. и физ.-мат. наук, № 1, 1963.
6. Х. П. Тааль. Улетучивание минеральных компонентов эстонских горючих сланцев при высоких температурах. Автореферат диссертации. Таллин, 1965.
7. В. В. Митор. Теплообмен в топках паровых котлов. Машгиз, 1963.
8. А. А. Отс, В. И. Резник. Труды ТПИ, серия А, № 209. Таллин, 1963.

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА
СЕРИЯ А № 240 1966

УДК 662.933 : 621.385.833.001.5

Н. С. Розанов, Г. А. Соо

К ВОПРОСУ МИКРОСКОПИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ЧАСТИЦ ПЫЛЕВИДНЫХ СЛАНЦЕВ

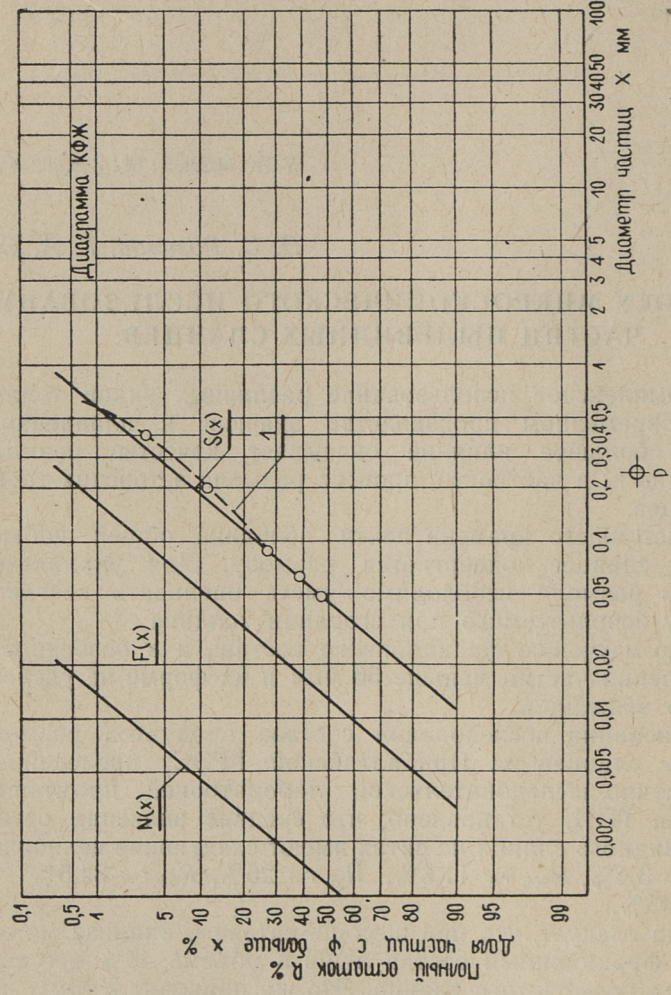
На комплексное использование различных видов топлив при одновременном производстве энергии и плавленного клинкера большое влияние оказывает качество размола этих топлив и, в частности, процесс размола эстонских горючих сланцев.

До настоящего времени почти половина общей добычи эстонских сланцев подвергается размолу. Для управления процессом размола необходимо уметь оценивать состав и структуру используемого при сгорании топлива.

Однако изучению фракционного состава и в особенности распределения частиц меньше 50 *мкм* и их форме не уделено должного внимания.

На основании исследований состава продуктов размола эстонских сланцев на Прибалтийской ГРЭС, проведенных ранее научно-исследовательской лабораторией промтеплоэнергетики ТПИ, установлено, что средние значения остатков пылевидного сланца на ситах имеют следующие величины: $R_{400} \approx 3{,}4\%$, $R_{200} \approx 11{,}6\%$, $R_{90} \approx 26\%$, $R_{63} \approx 34{,}5\%$ и $R_{50} \approx 45\%$.

Отсюда следует, что при помощи ситового анализа можно охватить фракционный состав лишь в объеме 45% весового количества размолотого сланца. Это же приводит к тому, что охватывается лишь $\sim$ 10% суммарной идеализированной поверхности пыли и менее 0,1% общего счетного количества частиц. Последнее получено на основе прямых распределения поверхности по размерам частиц и счетного их распределения по диграмме Колмогорова-Фай-Желева (диаграмма КФЖ) фиг. 1.



Фиг. 1. Характеристика пыли эстонских сланцев по диаграмме КФЖ:
1 — зерновая характеристики среднего состава пыли сланцев на Прибалтийской ГРЭС; $S(x)$ — прямая весового распределения; $F(x)$ — прямая поверхностного распределения; $N(x)$ — прямая счетного распределения

В настоящее время эту диаграмму можно считать наиболее целесообразной и наглядной для проведения такого рода исследований, и она позволяет систематизировать большое количество материала.

Из вышеприведенных данных следует, что неизвестной остается характеристика 55% весового количества сланцевой пыли. Неизвестны действительное весовое и счетное распределение, размер, форма, а также и суммарные поверхности частиц, поэтому и возникает необходимость исследовать частицы менее 50 *мкм*. Целью этих исследований должно явиться: установление распределния частиц по размерам, оценка формы частиц и соотношение их размеров, определение коэффициента формы, нахождение наименьших частиц, а также анализ агрегатов нескольких частиц.

Целесообразно также найти пути оценки мелкой фракции по физико-химическому составу.

Отсюда главное — четкое разделение частиц действительного помола сланца, по возможности не прибегая к воздействию на них какой-либо среды; установление количества частиц, подлежащих рассмотрению, для получения достоверного ответа по их распределению по размерам, точность замера и быстрота счета.

Для этого наиболее целесообразно использовать микроскопы, парк которых достаточно большой. Однако и седиментометрический анализ может в какой-то степени дать ответ на некоторые из поставленных вопросов. Но здесь надо помнить, что этот анализ производится в жидкой среде, а также требует взбалтывания. Эти же факторы могут повлиять на форму и размер самих частиц. Нежелательны также и другие методы, требующие диспергирования или другого рода воздействия на них, о которых будет сказано позже.

График счетного (теоретического) распределения частиц по диграмме КФЖ фиг. 1, прямая $N(x)$ показывает, что около 45% общего счетного количества частиц должно иметь размеры менее 1 *мкм*. Ввиду ограниченности применения оптического микроскопа для замера частиц (увеличение не более 500×), анализ предлагается проводить как на оптическом, так и электронном микроскопах, предусматривая при этом перекрытие по размерам частиц в диапазоне 8—2 *мкм*. В результате этого тонкий помол сланца в пределах 50 — 2 *мкм* исследуется под оптическим микроскопом, а в пределах 8—0,01 *мкм* и меньше на электронном.

В данном случае в качестве оптического микроскопа использован ланометр. Это микроскоп просвечивающегося типа 500× увеличения, имеет экран диаметром в 160 *мм*, на который нанесены измерительные шкалы с ценой деления в 2 *мкм*.

Приготовление анализируемых проб под оптический микроскоп производилось путем нанесения сухой пробы на стекло. В каждой пробе рассмотрению подлежало до 3000 частиц.

Для анализа частиц с размерами 0,01—8 *мкм* используется электронный микроскоп ЭМ-5 просвечивающего типа, требующий специального приготовления препаратов, удобных для просматривания.

При электронно-микроскопических исследованиях можно применять прямой и косвенный метод исследования.

Прямой метод заключается в нанесении пробы на пленку-подложку и помещении ее непосредственно в микроскоп.

Косвенный метод состоит из ряда операций, заключающийся в приготовлении реплики (отпечатка) с исследуемого образца.

Для дисперсных порошков наиболее простым и дающим хорошие результаты является прямой метод исследования. Для такого метода можно использовать два способа приготовления препаратов, каждый из которых преследует получение максимальной дисперсности — сухое нанесение пробы на пленку и нанесение на пленку суспензии, в которой находятся частички пробы.

В данном случае, в качестве пленки-подложки использовалась угольная пленка, полученная испарением и конденсацией угля в вакууме на стеклянную пластинку, с последующим снятием ее с помощью желатина, который при высыхании отрывает пленку от стекла. После растворения желатина в дистиллированной воде пленка вылавливается на медную сетку с ячейками 60 *мкм*.

Такой объекто-держатель является наиболее качественным — пленка механически прочна, термостойка, химически инертна и хорошо переносит электронную бомбардировку. На объекто-держатель пробы сланцевой пыли наносились методом сухого порошка и методом суспензии. Использование обоих методов дало возможность сопоставить полученные результаты и в конечном счете предпочесть сухое препарирование.

Метод сухого порошка. Готовый объекто-держатель помещается в сосуд с мелким пылевидным сланцем, затем несколько раз встряхивается и при вынимании удаляются излишки пробы.

Метод суспензии. В качестве жидкостей, в которых взвешиваются частички, были опробованы вода и спирт, как наиболее целесообразные. Для лучшего диспергирования использован ультразвуковой диспергатор УЗДВ2 с диапазоном частот от 400 до 2,5 *мгц*. После диспергирования проба наносилась пипеткой на объекто-держатель и высушивалась. Хорошие результаты дает нанесение пробы металлической петлей, которая после погружения в суспензию прижимается

к поверхности сетки с пленкой. Это обеспечивает хорошую равномерность смачивания всей поверхности пленки.

Определение увеличения. У микроскопа ЭМ-5 отсутствует устройство для определения увеличения. В качестве тест-объекта используется золотая реплика с дифракционной решетки с постоянной 1/600 *мм*. Для определения размеров была изготовлена выносная шкала, помещаемая на стекло наблюдательного окна. Для дублирования различных увеличений с помощью выносного миллиамперметра измерялся ток в проекционной линзе.

В результате этого можно фиксировать увеличения от 1000 до 30 000.

Некоторые результаты наблюдений

При прямом исследовании в электронном микроскопе рассматриваются формы проекций частиц, в дальнейшем именуемыми просто частицами.

На фото 1 представлены микрофотографии частиц пылевидного сланца промышленного размола, диспергированных в различных средах — *а*) в воде, *б*) в спирте. Наблюдается существенное различие, состоящее в том, что диспергирование в спирте приводит видимо к растворению какой-то части пробы, которая при диспергировании в воде имеет вид полупрозрачных частиц. Кроме этого, какая-то часть легких частиц при диспергировании в воде всплывает на поверхность (по всей видимости органическая часть топлива).

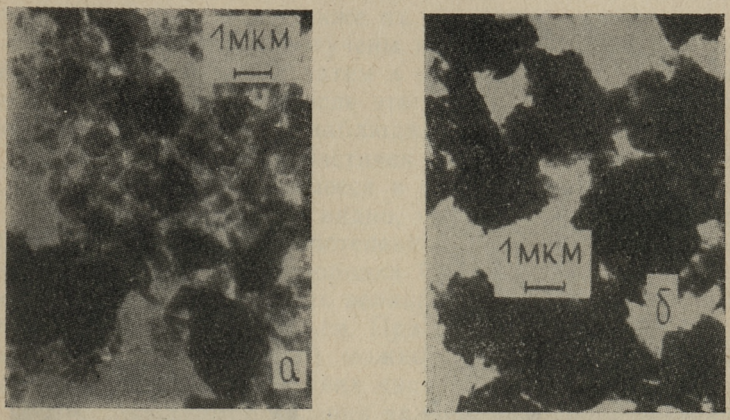


Фото 1. Частицы пылевидного сланца промышленного размола Прибалтийской ГРЭС (препараты приготовлены методом суспензии)

Ввиду влияния обеих жидкостей на пробу предпочтительным оказывается сухой метод приготовления препаратов. Метод сухого порошка имеет то преимущество, что порошок наносится в сухом виде, а этим исключается возможность дополнительной агломерации частиц и обеспечно их равномерное распределение. Главное же то, что анализируется действительный размол сланца. Метод сухого порошка очень прост, но может иметь несколько вариантов. Кроме вышеизложенного метода можно, например, порошок сначала наносить на лаковую пленку, а уже затем напылять угольную

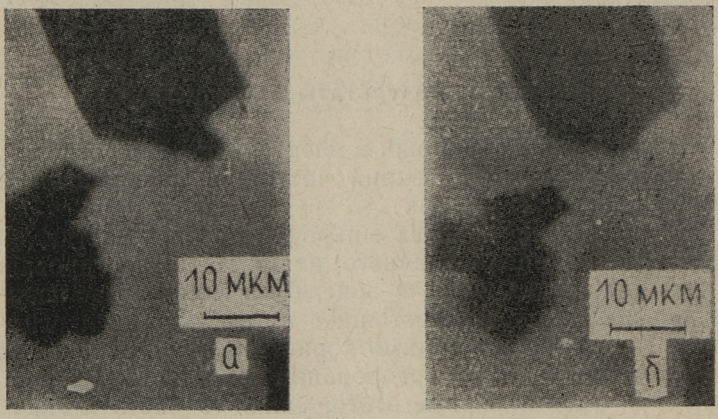


Фото 2. Частицы пылевидного сланца промышленного размола до и после сильного облучения (препарат приготовлен методом сухого порошка)

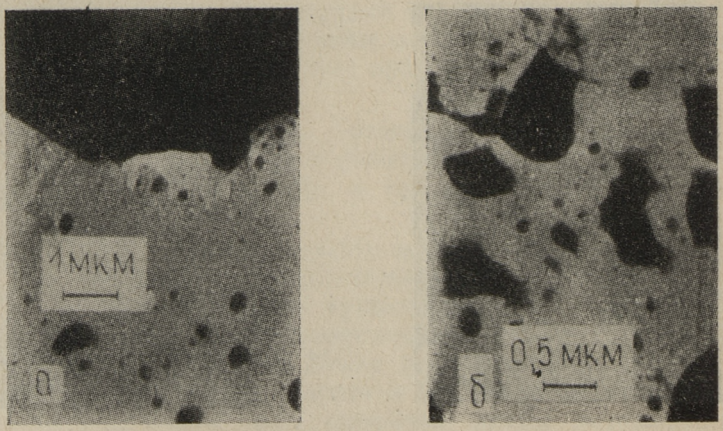


Фото 3. Различные стадии «плавления» частичек пылевидного сланца

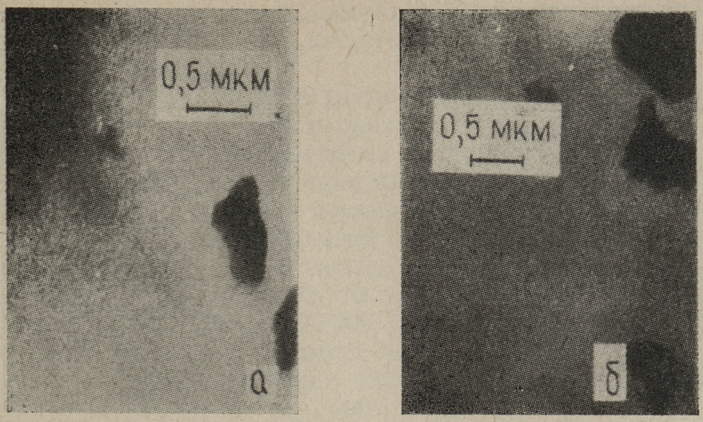


Фото 4. «Распыление» частичек пылевидного сланца цементного завода «Пунане Кунда» при облучении в электронном микроскопе

пленку, обладающей большей прочностью. Однако следует отметить, что под действием среды электронного микроскопа (вакуум, облучение и т. п.) в материале препарата любого приготовления могут происходить существенные изменения. Может происходить рост частичек, оплавление и даже «распыление». Это демонстрируют фото 2—4.

На фото 2 представлены микрофотографии частиц до сильного облучения — «*а*» и после сильного облучения — «*б*», из которых видно, что некоторые грани начали оплавляться.

На фото 3 представлены различные моменты «плавления» отдельных частичек, а также их «спекание».

Микрофотографии получены при плавном увеличении интенсивности облучения, затем в момент начала «оплавления» она резко убавлялась, после этого заметных явлений в изменении форм частичек не наблюдалось.

Кроме «плавления» частичек наблюдалось «распыление», т. е. явление заключающееся в оседании улетучившихся частей пробы. На фото *4а* видно, что около большой частички образовалась область с постепенно понижающейся плотностью очень мелких частичек порядка 0,01 *мкм*. На фото *4б* концентрация частичек не так велика и не видно частицы, от которой они могли появиться. При просматривании всей площади ячейки (3600 *мкм*^{2}) можно найти области с различной концентрацией таких мелких частичек.

Все наблюдаемые явления являются большой помехой при оценке действительных частичек пылевидного сланца, особенно частичек минимального размера. Во избежание появ-

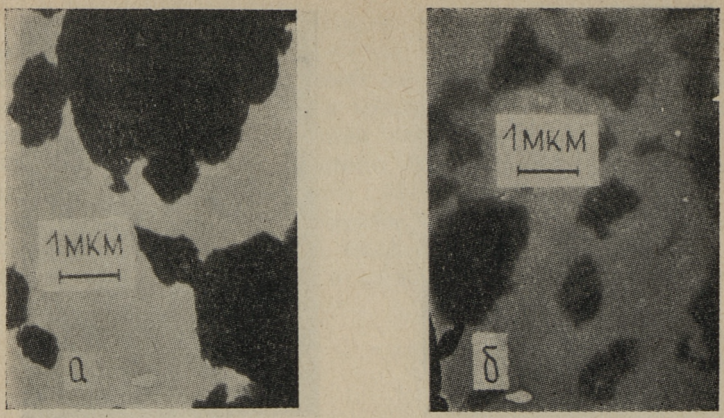


Фото 5. Частички сланцевой пыли Прибалтийской ГРЭС — *«а»* и *«б»* цементного завода «Пунане Кунда»

ления «лишних» частичек необходимо работать в режиме минимального облучения (т. е. освещения). Поскольку с достаточной точностью объяснить происхождение мелких частичек в настоящее время не представляется возможным, то считается необходимым дальнейшее изучение этого вопроса.

На фото 5 представлены микрофотографии частичек сланцевой пыли промышленного размола с Прибалтийской ГРЭС *«а»* и цементного завода «Пунане Кунда» — *«б»*. Видны явные различия в размерах частиц. Форма частиц очень неопределенна, поэтому оценка формы частиц весьма затруднительна. Для подобной оценки можно использовать микрофотографии, но получение большого числа их, т. е. необходимое для определения распределения частиц по размерам и форме, при современной технике эксперимента является очень трудоемкой задачей. Применение изготовленной нами фотокамеры с роликовой пленкой (в комплект микроскопа входят лишь камеры для работы с пластинками размером 45×60 *мм*) не дало достаточно хороших результатов из-за необходимости работать при высоком вакууме (10^{-4} *мм рт. ст.*), получение которого при помещении в микроскоп пленки явилось длительным процессом, поэтому преимущество пленок перед пластинками — экономия времени и средств — пока не оправдало себя.

Наиболее трудоемким в оценке характеристик пыли сланца является счет и определение размеров. В настоящей работе, как уже сказано, это произведено без применения какой-либо существенной механизации. Однако известно, что

имеются телевизионные микроскопы для счета мелких частиц, использование которых в значительной степени ускорило бы анализ одной пробы.

Для определения необходимого количества счета частиц и получения достоверного их распределения по размерам использована интегральная теорема Лапласа, которая показала, что при вероятности (заданная надежность) $P = 0{,}997$ и пределе ошибки в 1% счету подлежит 22 100 частиц. Если же предел ошибки принять равной 3—5%, то счету подлежит соответственно 2500—900 частиц, а если вероятность случайного события принять 0,999, то при ошибке в 1,3 и 5% счету подлежит соответственно 26 000, 2880, или 1040 частиц.

С другой стороны, Институт новых строительных материалов ВНИИНСМ предлагает количество считаемых частиц определять по выражению $\frac{100}{\sqrt{n}} = q\%$, где q — желаемая точность в %, n — необходимое число счета.

Данные предварительных исследований под ланометром и электронным микроскопом показали, что достаточно достоверные результаты получаются в пределах счета 2000—3000 частиц, т. е. предел ошибки согласно вышеизложенному не превышает 2—3%.

Эти предварительные данные, полученные в результате анализа проб пыли сланца, полученной путем размола на Прибалтийской ГРЭС и на цементном заводе «Пунане Кунда», показали, что имеется возможность сопоставлять их с данными теоретического распределения по счету, а также с поверхностным и весовым распределением.

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА
СЕРИЯ А № 240 1966

УДК 662.67:621.926.001.5

Арво А. Отс, Э. А. Комп,
Э. В. Юга, Агу А. Отс

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОТЫ СГОРАНИЯ НА УДЕЛЬНЫЙ РАСХОД ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И ИНТЕНСИВНОСТЬ ИЗНОСА БИЛ ПРИ РАЗМОЛЕ СЛАНЦЕВ В ШАХТНЫХ МЕЛЬНИЦАХ

Введение

Теплота сгорания сланцев во многом зависит от способа их добычи. При шахтной добыче эстонских горючих сланцев теплота сгорания рабочей массы топлива на 400—800 *ккал/кг* выше, чем при неселективной добыче из открытых карьеров. Снижение теплоты сгорания при переходе на открытую добычу происходит главным образом за счет увеличения процента содержания минеральной части. При этом соотношение между карбонатной и террогенной (песчано-глинистой) частями не сохраняется, а повышается с понижением теплоты сгорания.

Снижение теплоты сгорания сланцев повышает удельный расход электроэнергии на собственные нужды котла, увеличивается интенсивность износа бил шахтных мельниц, а также частота их поломок.

Одной из величин, от которой зависит удельный расход электроэнергии на размол, является теплота сгорания сланцев. Другие составляющие баланса энергии на собственные нужды (расход электроэнергии на тягу и дутье) значительно меньше зависят от качества сжигаемого топлива.

В данной статье приводятся результаты исследований удельного расхода электроэнергии и интенсивность износа бил при размоле эстонских горючих сланцев в шахтных мельницах в зависимости от качества (теплоты сгорания) топлива. Опыты были проведены на шахтных мельницах типа ШМТ 1300/2564/740/75, работающих с котлами ТП-17 ($D_{пе}$=220 *т/ч*, $p_{пе}$ = 100 *ати*, $t_{пе}$ = 540°С, $t_{пе}$ = 215°С), установленными на Прибалтийской ГРЭС.

Таблица 1

Удельный расход электроэнергии на размол сланцев

№№ п/п	Теплота сгорания, $Q_р^р$ *ккал/кг*	Паропроизводительность котла, $D_{пе}^{о}$ *т/ч*	Расход топлива, B *т/ч*	Суммарная мощность эл. двигателей мельниц, $\Sigma N_м$ *квт*	Удельный расход эл. энергии на тонну пара, $Э_п^р$ $\frac{квт.\ ч}{т}$	Удельный расход эл. энергии на тонну топлива, $Э_т^р$ $\frac{квт.\ ч}{т}$	Удельный расход эл. энергии на тонну условного топлива, $Э_{у.\ т.}^р$ $\frac{квт.\ ч}{т}$	Доля к.п.д. нетто котла для размола топлива, $\Delta\eta_р$ %	Примечание
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1417	127	64,8	402,1	3,17	6,20	30,7	1,38	
2	1529	167	76,7	429,2	2,57	5,60	25,4	1,14	
3	1532	125	57,7	435,0	3,48	7,55	34,7	1,55	
4	1569	193	86,8	332,8	1,72	3,83	17,7	0,77	
5	1669	139	60,2	410,3	2,95	6,82	28,6	1,28	
6	1669	143	61,9	434,3	3,04	7,02	29,5	1,32	Сланец открытой добычи
7	1691	174	71,4	386,7	2,22	5,42	22,6	1,01	
8	1691	176	74,9	388,8	2,21	5,19	21,6	0,97	
9	1722	134	55,2	387,0	2,89	7,02	28,7	1,29	
10	1872	223	84,0	363,4	1,63	4,32	16,2	0,73	
11	2219	192	61,2	422,7	2,20	6,90	29,1	1,31	
12	2219	205	65,3	432,6	2,11	6,63	21,0	0,94	

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
13	2346	167	48,1	272,0	1,68	5,65	16,90	0,76	
14	2360	201	57,7	309,0	1,56	5,37	15,83	0,71	
15	2370	214	61,6	312,0	1,50	5,06	15,00	0,67	
16	2518	200	55,2	313,4	1,54	5,68	15,84	0,71	Данные ОРГРЭС. Сланец шахтной добычи
17	2395	138	39,1	257,5	1,89	6,58	19,20	0,86	
18	2415	137	39,9	263,2	1,98	6,60	19,07	0,85	
19	2418	217	62,2	316,1	1,46	5,09	14,73	0,66	
20	2426	217	61,5	311,5	1,48	5,07	14,63	0,66	
21	2479	195	54,8	276,0	1,42	5,03	14,20	0,64	
22	2676	176	44,0	282,3	1,71	6,42	16,80	0,75	
23	2180	212	67,2	314,2	1,48	4,68	15,1	0,68	
24	2260	153	46,6	305,9	2,00	6,57	20,4	0,91	
25	2290	177	53,1	305,2	1,72	5,74	17,5	0,78	
26	2300	178	54,8	291,3	1,63	5,31	16,2	0,72	
27	2350	171	49,4	284,2	1,66	5,76	17,1	0,77	
28	2360	196	57,5	348,2	1,78	6,07	17,9	0,80	
29	2392	179	52,0	343,7	1,92	6,60	19,3	0,87	Данные ЦКТИ. Сланец шахтной добычи
30	2440	184	52,4	310,2	1,68	5,93	16,9	0,76	
31	2524	183	49,2	285,2	1,56	5,79	16,1	0,72	
32	2450	174	49,2	299,4	1,72	6,08	17,4	0,78	
33	2556	177	46,9	301,9	1,71	6,43	17,7	0,79	
34	2726	205	51,0	320,0	1,56	6,28	16,2	0,72	
35	2730	202	50,9	290,9	1,44	5,71	14,6	0,66	
36	2911	198	45,9	267,8	1,35	5,82	14,0	0,63	
37	3000	201	45,5	272,5	1,36	5,99	14,0	0,63	

Удельный расход электроэнергии на размол

Определение удельного расхода электроэнергии при размоле в шахтных мельницах было проведено со сланцами открытой добычи из карьера № 1 «Сиргала». Во время проведения опытов располагаемая теплота сгорания рабочей массы $Q_р^р$ колебалась в пределах 1417 — 2219 *ккал/кг*. Опыты проводились в интервале паропроизводительности котла $D°_{пе}$ = 125 —223 *т/ч* ($D°_{пе}$ — обозначает паропроизводительность котла при нормальных параметрах пара и питательной воды). В течение всех опытов поддержались постоянными паропроизводительность и воздушный режим котла. Удельный расход электроэнергии на размол определялся по электрической нагрузке двигателей мельниц (опыты проводились при работе всех четырех мельниц котла). В течение опыта средняя проба топлива была взята из течек сланца. Топливная нагрузка мельниц определялась по тепловому балансу котла. Для составления этого баланса котел был оборудован соответствующей измерительной системой.

Для получения более общих зависимостей между удельным расходом электроэнергии на размол сланцев и теплотой их сгорания, авторы обработали по принятой ими методике также опытные данные ОРГРЭС и ЦКТИ.

Результаты обработки опытных данных приведены в таблице 1, туда же нанесены результаты, полученные на основе опытных данных ОРГРЭС и ЦКТИ. Удельные расходы электроэнергии определялись по формулам:

а) на тонну вырабатываемого пара при номинальных параметрах

$$Э_п^р = \frac{\Sigma N_м}{D_{пе}^о} \quad квт.ч/т,$$

б) на тонну размолотого топлива

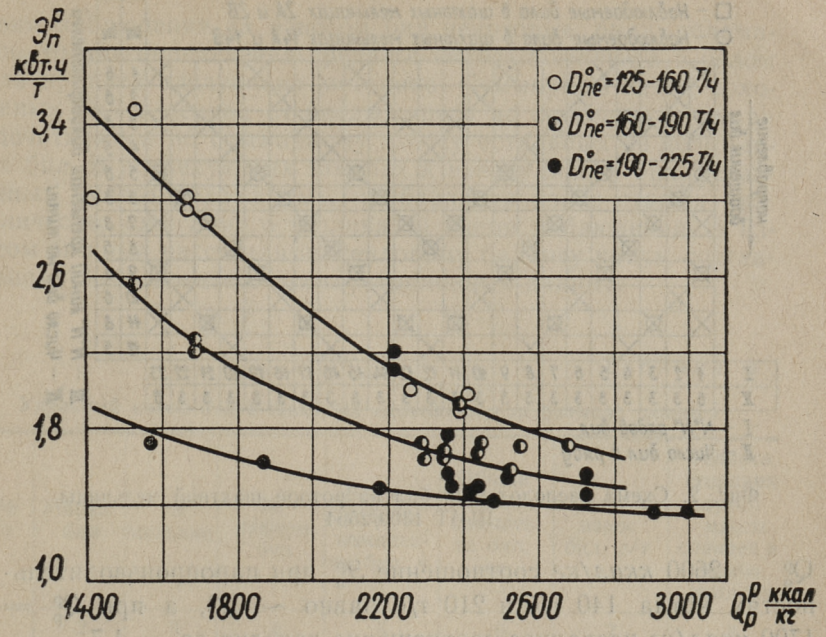
$$Э_т^р = \frac{\Sigma N_м}{B} \quad квт.ч/т,$$

в) на тонну размолотого условного топлива

$$Э_{у.т.}^р = \frac{7000}{Q_р^р} Э_т^р \quad квт.ч/т,$$

где ΣN_m — суммарная средняя мощность электромоторов в течение опыта, *квт;*

$D°_{пе}$ — средняя паропроизводительность котла при номинальных параметрах пара и питательной



Фиг. 1. Зависимость удельного расхода электроэнергии на размол от теплоты сгорания сланцев

воды ($p_{пе} = 100$ *ати*, $t_{пе} = 540°C$, $t_{пв} = 215°C$ в течение опыта, *т/ч*;

B — средний расход топлива в течение опыта, *т/ч*.

В таблице 1 приведена также доля к. п. д. нетто котла на размол $\Delta\eta_р$, которая определялась по формуле

$$\Delta\eta_р = \frac{7000\ b\ Э_т^р}{1000\ Q_р^р}\ 100\%,$$

где b — удельный расход условного топлива на выработку 1 *квт.ч* электроэнергии (в расчетах принималось $b = 0{,}448$), *кг/квт.ч*.

Изменение удельного расхода электроэнергии на размол топлива в зависимости от располагаемой теплоты сгорания рабочей массы сланца представлено на фиг. 1. Точки сгруппированы по паропроизводительности котла.

Из представленных данных выясняется, что удельный расход электроэнергии на размол сланца $Э^р$ с увеличением располагаемой теплоты сгорания уменьшается. С понижением паропроизводительности котла $Э^р$ увеличивается, причем в области более высокой располагаемой теплоты сгорания топлива зависимость $Э^р$ от $Q_р^р$ слабее. Так, например, при

Фиг. 2. Схема расположения бил на роторе шахтной мельницы ШМТ 1300/2564

$Q^р_р$ = 2600 *ккал/кг* соотношение $Э^р_п$ при паропроизводительностях котла 140 *т/ч* и 210 *т/ч* равно ~ 1,3, а при $Q^р_р$ = 1700 *ккал/кг* названное соотношение доходит до ~ 1,7.

Анализ расхода электроэнергии на собственные нужды (размол топлива, тяга и дутье) котла ТП-17 показывает, что снижение теплоты сгорания сланца на 100 *ккал/кг* увеличивает удельный расход электроэнергии на 1 тонну вырабатываемого пара на ~ 0,25 *квт. ч/т* и снижает к.п.д. нетто котла примерно на 0,1% при данной паропроизводительности котла.

Износ бил шахтных мельниц

Для выявления влияния качества топлива на интенсивность износа бил шахтных мельниц, опыты были проведены на котле № 2 (мельница 2А и 2В) при размоле сланцев открытой добычи и на котле № 14 (мельницы 14А и 14В) при размоле сланцев шахтной добычи. Износу подвергались била марки Г-13 и IXЛ. Из общего числа бил (75 бил) под наблюдение было взято в шахтных мельницах котла № 2 — 12 бил и котла № 14 — 23 била. Месторасположение наблюдаемых бил показано на фиг. 2.

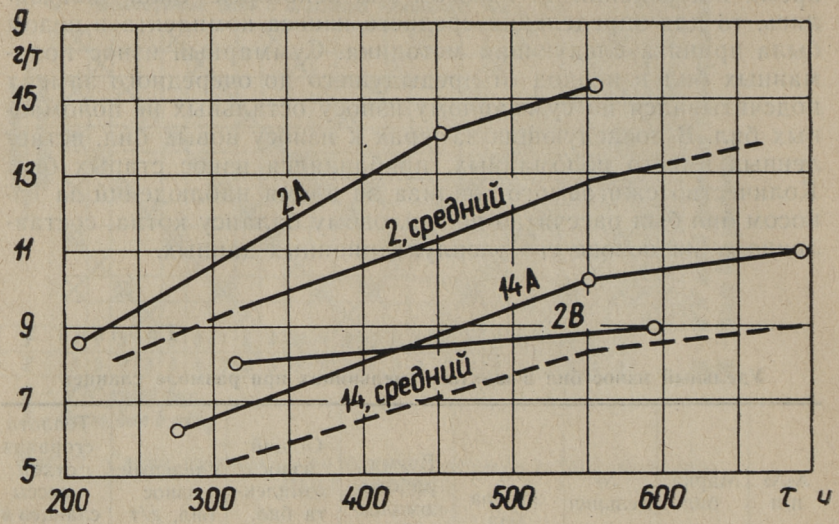
Для определения интенсивности износа бил, наблюдаемые била замерялись 2—3 раза до полного износа комплекта. На основе износа наблюдаемых бил был рассчитан средний износ всего комплекта, учитывая при этом, что в крайних рядах бил 2 раза больше, чем в остальных (фиг. 2). Поскольку во

время наблюдения за износом бил некоторые била поломались, то для определения среднего износа комплекта в целом была принята следующая методика. Суммарный износ поломанных бил в период от предыдущего до очередного замера подсчитывался по суммарному износу остальных не поломанных бил. В последующих замерах к износу новых бил, вставленных вместо поломанных, прибавлялся износ старых бил. Количество сжигаемого топлива за время наблюдений за износом бил был рассчитан по тепловому балансу котла, составленному на основе его эксплуатационных данных.

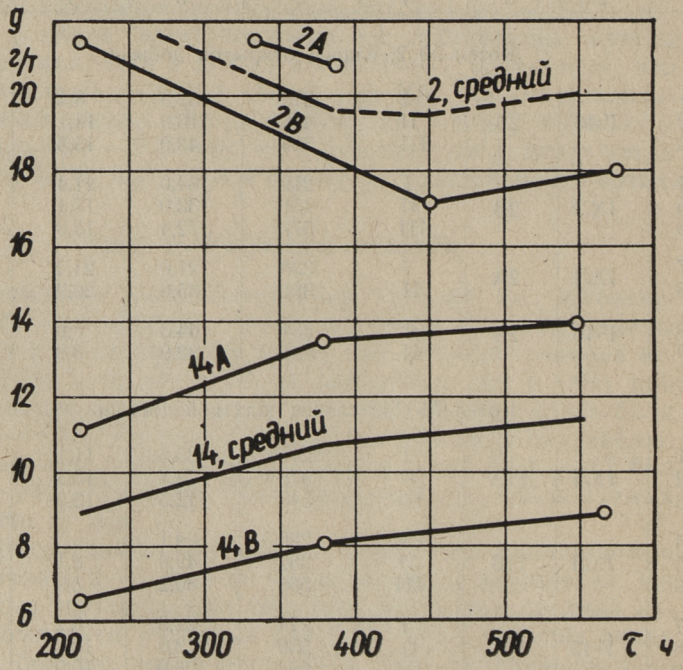
Таблица 2

Удельный износ бил в шахтных мельницах при размоле сланцев

№№ п/п	Марка бил	№ мельниц	№ замера бил	Время работы комплекта бил, *ч*	Общий износ комплекта бил, *кг*	Удельный износ бил, *г/т*	Теплота сгорания сухой массы сланцев в бомбе, *ккал/кг*
1	2	3	4	5	6	7	8
			Котел № 2, сланец открытой добычи				
1	Г-13	2А	I	212	32,9	8,4	1880
2			II	455	110,0	14,1	1984
3			III	584	148,0	15,3	2013
4	ІХЛ	2В	I	212	84,0	21,4	1880
5			II	451	133,0	17,1	1984
6			III	576	172,4	18,0	2012
7	ІХЛ	2А	I	338	121,0	21,4	2160
8			II	381	135,6	20,9	2115
9	Г-13	2В	I	331	44,3	8,0	2160
10			II	591	82,0	8,9	2059
			Котел № 14, сланец шахтной добычи				
11	ІХЛ	14А	I	218	35,6	11,1	2934
12			II	379	72,8	13,3	2932
13			III	543	112,5	13,9	2921
14	ІХЛ	14В	I	220	24,1	6,3	2934
15			II	382	49,6	8,1	2932
16			III	568	80,2	8,9	2921
17	Г-13	14А	I	274	22,3	6,2	2935
18			II	550	73,0	10,3	2935
19			III	684	96,9	10,9	2936



Фиг. 3. Зависимость интенсивности износа бил марки Г-13 от времени



Фиг. 4. Зависимость интенсивности износа бил марки IXЛ от времени

Результаты расчета удельного износа бил по вышеуказанной методике приведены в таблице 2. Часы работы мельниц котлов № 2 и № 14 полностью сравнимы, т. к. средняя паропроизводительность котлов составляет соответственно 153 и 158 *т/ч*. На фигурах 3 и 4 представлена зависимость удельного износа бил *g*, рассчитанного на 1 тонну топлива от времени работы мельниц. Эти данные показывают, что в общем удельный износ бил возрастает с увеличением числа часов работы мельниц. Снижение удельного износа бил со временем, наблюдаемое при износе бил марки IXЛ в мельницах 2А и 2В перед вторым замером износа (фиг. 4), вероятно вызвано большим числом поломок наблюдаемых бил (общий износ определялся экстраполированием).

Из приведенных данных также выясняется, что удельный износ бил одной и той же марки при размоле того же топлива в разных мельницах может отличаться друг от друга до 1,5 раза. Очевидно, что это вызвано различной степенью износа брони и частично также различной топливной нагрузкой мельниц (износ определен по среднему расходу топлива ко всему котлу).

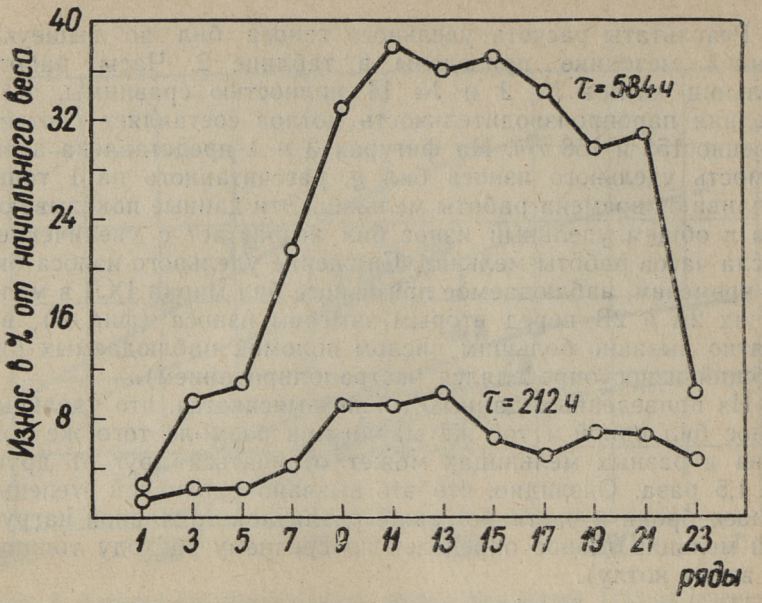
На фигурах 3 и 4 нанесены также ориентировочные средние удельные износы бил.

Средний удельный износ бил за 550 часов работы шахтной мельницы составляет:

1) При размоле сланцев шахтной добычи
   для бил марки IXЛ — 11,4 *г/т*,
   для бил марки Г-13 — 8,3 *г/т*.
2) При размоле сланцев открытой добычи
   для бил марки IXЛ — 20,0 *г/т*,
   для бил марки Г-13 — 12,8 *г/т*.

Относительный рост удельного износа бил при переходе от размола сланцев шахтной добычи к размолу сланцев открытой добычи составляет для бил марки IXЛ — 1,75 и для бил марки Т-13 — 1,54 (располагаемая теплота сгорания рабочей массы соответственно 1550 и 2300 *ккал/кг*).

Приведенные результаты подтверждаются также статистическими данными израсходованных бил в шахтных мельницах на Прибалтийской ГРЭС в течение 1964 года. При работе на сланцах шахтной добычи и использовании преимущественно бил марки IXЛ количество выработанного пара на один бил составляет 485 *т*, в то же время при работе на сланцах открытой добычи это равно 352 *т*. Таким образом расход бил при размоле сланцев открытой добычи около 1,4 раза больше. Уменьшенный расход бил по сравнению с данными этих опытов связан, очевидно, с тем, что била в мельницах при работе на сланцах открытой добычи заменялись новыми при



Фиг. 5. Относительный износ бил марки Г-13 вдоль ротора шахтной мельницы

их большем износе, чем в мельницах, работающих на сланцах шахтной добычи.

Следует отметить большое количество поломок бил марки IXЛ при размоле сланцев открытой добычи. Из всех 24-х наблюдаемых бил поломанными оказались 13 бил, т. е. 54%.

Износ бил вдоль ротора не происходит равномерно. В средней части ротора била изнашиваются значительно больше, чем в крайних рядах. Для иллюстрации сказанного на фиг. 5 приведен относительный износ бил вдоль ротора.

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА
СБОРНИК СТАТЕЙ VI
Таллинский политехнический институт
Редактор В. Валликиви
Технический редактор Я. Мыттус
Сдано в набор 18/III 1966. Подписано к печати 27/VII 1966. Бумага 60×90 1/16. Печатных листов 5,25. Учетно-издательских листов 4,60. МВ-06084. Тираж 500. Заказ № 637.
Типография «Пунане Тяхт», Таллин. ул. Пикк, 54/58.
Цена 30 коп

Eesti NSV Tööstuse Raamatukogu Teaduste Akadeemia

Цена 30 коп.