

И. П. ЭПИК

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЕ СЖИГАНИЕ ЭСТОНСКИХ СЛАНЦЕВ: ТЕОРИЯ, ПРАКТИКА, КРИТИКА

Теория

В 60-х гг. в Таллинском политехническом институте для определения характера влияния температурного режима топочного процесса на свойства минеральных остатков эстонских горючих сланцев проводились лабораторные исследования улетучивания калия при нагревании золы этих сланцев, описанные Х. П. Таалем [1, 2] и затем реферированные во многих публикациях.

Опыты, описанные в [2], были проведены в интервале температур 1000—1500°C в трех средах: CO, CO₂ и воздушной (рис. 1). Исходя из того, что содержание K₂O в лабораторной золе сланцев составляло 1,91%, экспериментальные данные [2] аппроксимировали следующим образом:

для среды CO

$$\ln z_{CO} = 37 \cdot 300T^{-1} - 20,2 \quad (1)$$

и для воздушной среды

$$\ln z_{0,21 O_2} = 36 \cdot 300T^{-1} - 15,6, \quad (2)$$

где T — температура, К, и z — время, необходимое для полного улетучивания калия из золы, с.

Судя по уравнениям (1) и (2), скорость улетучивания калия в среде CO превышает скорость улетучивания в воздушной среде —

$$\ln z_{0,21 O_2} - \ln z_{CO} \approx 4$$

или

$$z_{0,21 O_2} / z_{CO} \approx e^4 \quad (3)$$

— в среднем в 60 раз.

Очевиден вывод, что калий улетучивается в зоне активного горения летучих и кокса, когда к поверхности частиц топлива не поступает достаточного количества кислорода, вследствие чего среда там является восстановительной.

Зависимость времени z , необходимого для полного улетучивания калия из золы, от температуры представлена в таблице и на рис. 2. Видно, что при температуре в ядре горения (в зоне максимального тепловыделения) пылесланцевого факела около 1600—1800 К условия перехода значительной части калия из минералов (слюд, ортоклаза) в газовую фазу наиболее благоприятны.

Специальных промышленных или стендовых исследований этого механизма нет, имеются лишь некоторые весьма косвенные данные. Например, изученная Х. Х. Арро летучая зола из-под электрофильтров содержала 15—20% от общего калия в составе KCl, а пробы летучей золы, собранные путем отсасывания из газотока, имели приблизительно такую же долю калия в хлориде [3].

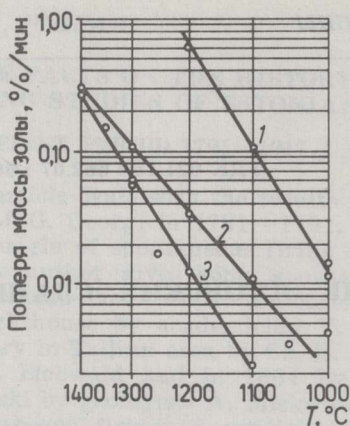


Рис. 1
Зависимость потери массы сланцевой золы за счет улетучивания калия (в пересчете на K_2O) от температуры нагрева [2]: 1 — в среде CO , 2 — в среде CO_2 , 3 — в воздушной среде

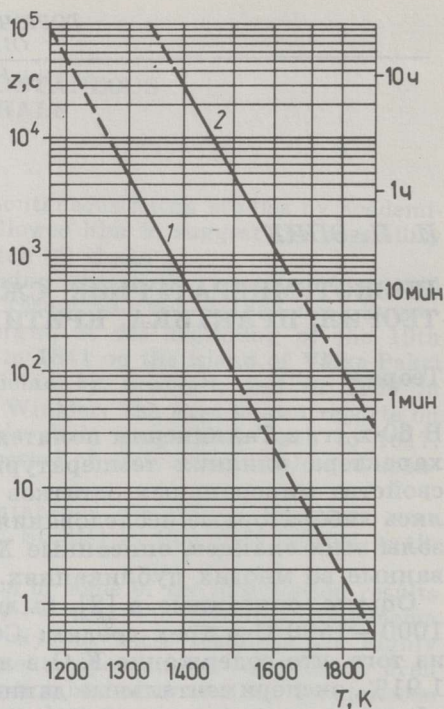


Рис. 2
Зависимость времени, необходимого для полного улетучивания калия из сланцевой золы, от температуры нагрева, соответствующая: 1 — уравнению (1), 2 — уравнению (2). Сплошная прямая — пределы опытных точек, пунктирная прямая — экстраполяция

Время, необходимое для полного улетучивания калия из сланцевой золы

Среда	Температура, К						
	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800
CO	15 ч*	1,4 ч	10,5 мин	106 с	22,5 с*	5,7 с*	1,2 с*
Воздушная	—	—	8,5 ч*	1,5 ч	20 мин	5,3 мин	96 с*

* Экстраполяция по уравнениям (1) и (2).

При сжигании сланцев KCl может образовываться только в случае очень быстрого улетучивания калия из содержащих его минералов. Хлор выделяется при термическом разложении керогена, образуя, вероятно, HCl . Однако уже при относительно низких температурах карбонат кальция эстонских сланцев разлагается (активный распад начинается при температуре около 1200 К) с выделением свободной извести в количестве, достаточном для нейтрализации HCl . При продолжительном разложении слюд и ортоклаза, на более поздних стадиях топочного процесса, когда органическая и пиритная сера уже окислились и хлор нейтрализован кальцием, освободившийся из минералов калий уже может образовывать главным образом сульфаты. Поскольку, по сегодняшним представлениям [3, 4 и др.], KCl является основным фактором, вызывающим при сжигании эстонских сланцев высокотемпературную коррозию и загрязнение поверхностей нагрева

с плотными отложениями (со временем KCl переходит в отложениях золы в K_2SO_4), отмеченные опыты Х. П. Тааля, Х. Х. Арро и др. наметили возможные пути улучшения условий работы котлов посредством низкотемпературного сжигания, позволяющего избежать улетучивания калия из минералов.

Длительное время проблемой низкотемпературного сжигания богатых солями ($NaCl$, Na_2SO_4) бурых углей района Магдебурга-Галле (ГДР) занимался В. Бойе (публикации В. Бойе по данному вопросу относятся к 1942—1977 гг. [5]). Основная идея В. Бойе — секционирование топочной камеры пылеугольного котла двухсветными экранами в районе горелок для существенного снижения температуры пламени, а также понижение температуры воздуха или отказ от подогрева воздуха и угрубление размола пылевидного топлива. Предложения В. Бойе были реализованы в 60-х гг. в конструкции котлов для завода «Буна» паропроизводительностью 125 т/ч (35 кг/с) [5], с инвертной пылеугольной топкой и потолочными горелками, позволившими осуществить секционирование топочной камеры при помощи подвесных ширмовых поверхностей нагрева. Однако опыт низкотемпературного сжигания содержащих $NaCl$ бурых углей (0,5—1% на сырую массу) не получил дальнейшего развития.

Температура начала плавления золы таких углей составляет 1150—1225 К [5], а температура плавления и начала испарения чистого $NaCl$ — лишь 1074 К (для KCl — 1046 К).

Сооружение крупного пылеугольного котла с такими низкими температурами в топочной камере, которые препятствовали бы улетучиванию хлоридов натрия и калия, просто невозможно. Не эффективны в этом случае и другие известные способы сжигания твердого топлива — слоевое и вихревое сжигание и сжигание в аэрофонтанной топке: они невыгодны из-за слишком продолжительного срока пребывания топлива под воздействием температуры в активной зоне горения.

Несколько иначе обстоит дело с низкотемпературным сжиганием эстонских сланцев. Образование вредных для эксплуатации котла хлоридов калия (в основном) и натрия обусловлено прежде всего освобождением и улетучиванием калия и натрия из их основных носителей в минеральной части сланца (ортоклаза $K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$, начало разложения 1445 К, и гидрослюда $K_2O \cdot CaO \cdot 8Al_2O_3 \cdot 16SiO_2 \cdot 8H_2O$, появление первых жидких фаз при 1270—1370 К). Это значит, что понятие «низкотемпературное сжигание» для эстонских сланцев характеризуется температурами на 300—400 К больше*, чем при сжигании «засоленных» бурых углей ГДР.

Практика

В настоящее время на электростанциях Эстонглавэнерго в стадии промышленных испытаний находится два метода низкотемпературного сжигания эстонских сланцев [7, 10, 11]:

1. Несколько стадий промышленных опытов прошел метод низкотемпературного вихревого (НТВ) сжигания, разработанный В. В. Померанцевым, Ю. А. Рундыгиным (Ленинградский политехнический институт им. М. И. Калинина), Ю. А. Халлингом (проектно-конструкторское бюро Эстонглавэнерго) и др. Сущность его заключается в сжигании сланцевой пыли грубого помола в топочной камере в условиях многократной циркуляции (вихря) с применением ширмовых поверхностей нагрева в ядре горения для снижения его температуры. Опыт

* Это не относится к диктионемовым сланцам Эстонской ССР [6].

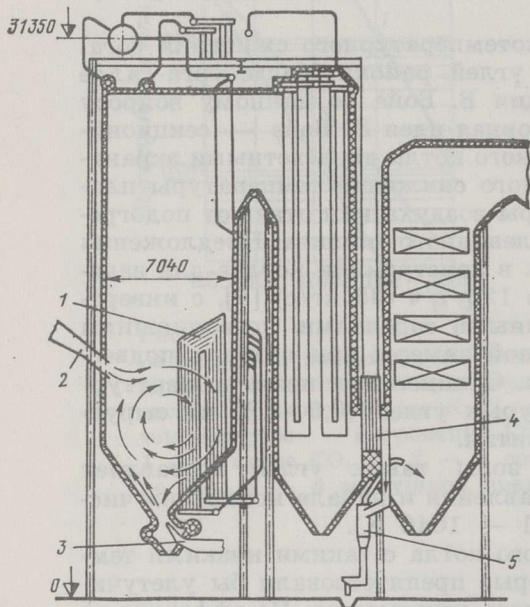


Рис. 3

Низкотемпературная вихревая топка котла ТП-17 [7]: 1 — топочные ширмы (6 ширм) пароперегревателя, 2 — прямотопочные горелки (4 штуки), 3 — воздушная коробка нижнего дутья, 4 — охлаждаемый жалюзийный золоуловитель, 5 — циклон

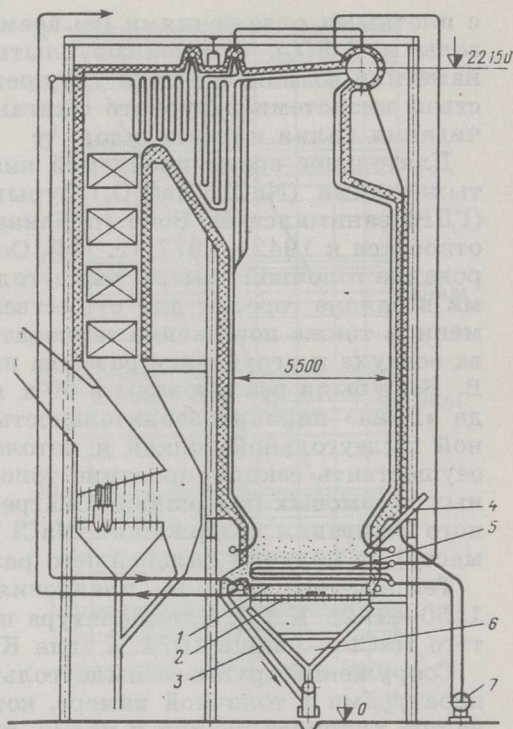


Рис. 4

Котел БКЗ-75-39ФСЛ с топкой факельно-кипящего слоя [7]: 1 — пароперегреватель в слое, 2 — колпачковая решетка, 3 — золоудаление, 4 — подача топлива, 5 — испарительная поверхность в кипящем слое, 6 — воздушная коробка, 7 — насос принудительной циркуляции

эксплуатации реконструированного ранее по этой схеме котла БКЗ-75-39ФСЛ на ТЭЦ «Ахтме» дал возможность реконструировать котел ТП-17 (60 кг/с) на Прибалтийской ГРЭС для дальнейшей обработки метода (рис. 3).

2. Разработанный Эстонглавэнерго совместно со Всесоюзным научно-исследовательским и проектно-конструкторским институтом атомного энергетического машиностроения (Ф. М. Яхилевич, А. Л. Шрадер, А. Н. Семенов, Ю. А. Халлинг и др.) метод двухступенчатого сжигания сланца угрубленного помола в факельно-кипящем слое с поверхностями нагрева, погруженными в слой. Этот метод внедрен на котле БКЗ-75-39ФСЛ на ТЭЦ «Ахтме» (рис. 4).

По оценкам Эстонглавэнерго, опыт работы всех реконструированных котлов положительный [7].

По данным [8], при НТВ-сжигании котел ТП-17, имеющий встроенный до водяного экономайзера охлаждаемый тепловыми трубами жалюзийный золоуловитель для защиты хвостовых поверхностей нагрева от интенсивного золового износа длительное время (более 6 тыс. ч) может работать практически без очистки экранов топки и пароперегревателя. По химическому составу золовые отложения при НТВ-сжи-

гании практически не отличаются от золовых отложений обычных пылесланцевых котлов, наблюдается лишь некоторое снижение содержания коррозионно-активных компонентов. Очевидно, что механизм образования отложений остается прежним, однако интенсивность их образования снижается, а отсутствие очистки уменьшает их склонность к коррозии металла труб.

Приблизительно так же характеризуется в статье Э. А. Амана [7] эксплуатация опытного котла среднего давления (4,0 МПа) БКЗ-75-39ФСЛ со сжиганием сланца в низкотемпературном кипящем слое: надежная и длительная работа при номинальных параметрах пара и высокой нагрузке котла (80 т/ч), при полном отсутствии шлакования экранов топки и конвективного пароперегревателя, а также заносов поверхностей нагрева отложениями. Поверхности нагрева, погруженные в слой, оставались чистыми при всех режимах котла.

В топке котла ТП-17 при НТВ-сжигании достигнуто существенное снижение максимальной температуры [9]: в обычных топках этих котлов максимальные температуры при нагрузке котла, равной 0,5—1 номинальной, составляют 1600—1700 К, в НТВ-топке — 1450—1500 К при тонине помола R_{90} 40—50% и 1350—1450 К при угрубленном помоле, R_{90} 80—90%.

Согласно уравнению (1), этим температурам соответствуют следующие минимальные отрезки времени, необходимые для полного улетучивания калия из золы в среде СО: в обычных топках около 6 с, в НТВ-топке при тонком помоле около 100 с и при грубом помоле около 300 с, т. е. в случае НТВ-топки требуется в 15 или даже в 50 раз больше времени для достижения уровня улетучивания калия, характерного для обычной пылесланцевой топки. Вполне возможно (однако измерениями не установлено), что при этом резко уменьшается содержание КСl-аэрозоля в дымовых газах, поскольку даже при обычном пылевидном сжигании только 15—20% калия успевает перейти в КСl. А как уже было отмечено выше, более продолжительная выдержка золы в активной зоне вихревой или слоевой топки может и не иметь существенного влияния на образование КСl.

Критика

Несмотря на положительные итоги промышленных опытов [7, 10, 11] по низкотемпературному сжиганию эстонских и ленинградских сланцев (НТВ-топка работает также на ТЭЦ сланцеперерабатывающего комбината «Сланцы» под котлом среднего давления БКЗ-75-39ФСЛ [12]), опубликованные к настоящему времени данные о работе опытных котлов и теоретический анализ этих данных* не могут в должной мере удовлетворить внимательного читателя.

Например, неожиданно высоким оказалось содержание в летучей золе котла с НТВ-сжиганием растворимого в воде калия. Доля его в летучей золе составляет в случае НТВ-топки 31—38% от общего его содержания [13] против 15—20% для обычного пылесланцевого котла ТП-17 [3]. Причина «снижения химической активности» золы при НТВ-сжигании [9] в опытах не установлена. В летучей золе обычного котла ТП-17 отмеченные 15—20% калия находятся в агрессивнейшем соединении — КСl. Вопрос о том, в каком виде растворимый калий находится в летучей золе низкотемпературной топки, пока не заинтересовал авторов внедрения низкотемпературных методов сжигания эстонских сланцев.

* По итогам исследований работы котла ТП-17 с НТВ-сжиганием защищены кандидатские диссертации А. В. Литинецкого (1983) и Г. В. Алфимова (1984).

Недостаточное уважение к теории низкотемпературного сжигания выражается также и в том, что в работах авторов методов низкотемпературного сжигания сланцев нет никаких упоминаний о работах Х. П. Тааля [1, 2].

Другие критические замечания относятся к изложению эксплуатационных характеристик котлов с низкотемпературным сжиганием, особенно котла ТП-17-НТВ. Утверждение, что этот котел может работать без применения средств очистки поверхностей нагрева топки и пароперегревателя [8], не аргументировано. Вряд ли он проработал 12—17 тыс. ч без остановок и ручной расшлаковки, которые способствуют поддержанию некоего оптимального уровня загрязненности котла. Более того, в [9, 14] большинство авторов [8] (И. И. Лысаков, Я. А. Мааренд, Ю. А. Рундыгин, А. Г. Соловей) признали, что в течение всей опытной эксплуатации котла в работе находились фестонные паровые аппараты, в зону действия которых попадает около 20% фронтальных ширм конвективного пароперегревателя, а для очистки экранов топки эпизодически использовались аппараты М-3, которые после 9 тыс. ч наработки котла включались регулярно 1 раз в смену.

Четкие разъяснения тем более необходимы, что исследователи способов низкотемпературного сжигания сланцев пришли к выводу, что состав золовых отложений низкотемпературного сжигания сланца существенно не отличается от состава отложений обычных пылесланцевых котлов, что указывает на сохранение механизма их образования [9]. Следует также напомнить, что показавшийся вначале весьма положительным опыт длительной (более 20 тыс. ч) работы пылесланцевых котлов ТП-101 без применения средств очистки поверхностей нагрева привел к пережогу вторичных пароперегревателей.

Критические замечания следует закончить тем, что исследователи как НТВ-сжигания, так и сжигания в факельно-кипящем слое пока не опубликовали данных о режимах работы котлов при существенных разгрузках их по мощности, которые бывают необходимы при покрытии полуцикловых частей графика потребления электроэнергии.

Заключение

Авторы разработок новых способов уменьшения активности летучей золы эстонских сланцев при помощи методов низкотемпературного сжигания правильно подошли к решению поставленных задач, постепенно и обоснованно переходя от мелких к более крупным промышленным опытам. Однако недостаточное внимание к раскрытию физических основ процесса и отсутствие продуманного сопоставления рабочих характеристик реконструированных котлов с данными о работе обычных пылесланцевых котлов снижают достоверность и надежность полученных выводов, что создает угрозу соскальзывания этих работ на малопродуктивные пути «слепого» эмпиризма.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Тааль Х. П.* Улетучивание соединений щелочных металлов минеральной части горючих сланцев. — Изв. вузов. Энергетика, 1964, № 10, с. 58—63.
2. *Тааль Х. П., Махлану А. Я., Эник И. П.* Влияние температуры и среды на улетучивание калия из золы эстонских горючих сланцев. — Тр. / Таллин. политех. ин-т, сер. А, 1966, № 240, с. 45—53.
3. *Арро Х., Эник И.* О роли хлоридов в процессах загрязнения и коррозии поверхностей нагрева при сжигании эстонских сланцев. — Изв. АН ЭССР. Физ., Матем., 1967, 16, № 4, с. 483—488.
4. *Эник И. П.* Проблемы загрязнения и коррозии поверхностей нагрева парогенераторов при сжигании твердых топлив. — Изв. вузов. Энергетика, 1966, № 6, с. 45—52.
5. *Boie W.* Verschmutzungsfreie Dampferzeuger auch bei «bösaertiger» Asche? — *Energietechnik*, 1977, 27, Н. 6, S. 242—245.
6. *Лэне Р., Ууэсоо Р.* Экспериментальное исследование процесса горения диктионемового сланца в кипящем слое. — Сланц. и хим. пром-сть, 1966, № 5, с. 19—24.
7. *Аман Э. А.* Основное направление развития энергетики — ускорение научно-технического прогресса. — Электрические станции, 1983, № 10, с. 2—5.
8. *Померанцев В. В., Рундыгин Ю. А., Лысаков И. И. и др.* Опыт годичной эксплуатации котла ТП-17 ст. № 13 Прибалтийской ГРЭС при сжигании сланцев в низкотемпературном вихре: Тез. докл. — Барнаул, 1983, с. 50—53.
9. *Альфимов Г. В., Лайд Я. П., Литинецкий А. В. и др.* Исследование работы топочных поверхностей нагрева котла ТП-17 при низкотемпературном вихревом сжигании сланцев. — Тр. / Таллин. политех. ин-т, 1984, № 578, с. 67—77.
10. *Яхилевич Ф. М., Семенов А. Н., Глебов В. П. и др.* Энергетический котел с топкой кипящего слоя на прибалтийском сланце. — Теплоэнергетика, 1984, № 5, с. 8—9.
11. *Рундыгин Ю. А., Семенов А. Н., Мааренд Я. А. и др.* Опыт низкотемпературного сжигания сланцев в энергетических котлах. — Теплоэнергетика, 1984, № 5, с. 9—12.
12. *Померанцев В. В., Рундыгин Ю. А., Конович М. Н. и др.* Исследование и совершенствование низкотемпературного вихревого сжигания сланцев в котлах среднего давления. — Тр. / Таллин. политех. ин-т, 1977, № 416, с. 65—77.
13. *Отс А. А., Прикк А. В., Арро Х. Х. и др.* Исследование превращения минеральной части сланцев при вихревом сжигании. — Тр. / Таллин. политех. ин-т, 1977, № 416, с. 79—84.
14. *Альфимов Г. В., Лайд Я. П., Литинецкий А. В. и др.* Исследование работы пароперегревателя котла ТП-17 при низкотемпературном вихревом сжигании сланцев. — Тр. / Таллин. политех. ин-т, 1984, № 578, с. 57—66.

Академия наук Эстонской ССР
г. Таллин

Поступила в редакцию
6. 03. 1985

**LOW-TEMPERATURE COMBUSTION OF ESTONIAN OIL SHALE:
THEORY, PRACTICE, CRITIQUE**

The low-temperature combustion provides for preventing the volatilization of mineral compounds of fuel ashes into the combustion gases. In the case of Estonian oil shale combustion, the main fouling compound in the combustion gases involves the potassium chloride, synthesized in the course of combustion by the chlorine of shale kerogen and by the potassium volatilized from the alkali-bearing ash constituents (orthoclase, clay minerals). The laboratory experiments (Taal, 1964; Taal et al., 1966) at 1300—1800 K have shown an exponential dependence of shale ash potassium volatilization velocity on the temperature (Figs. 1 and 2). It has been also estimated that with pulverized shale burning about 15—20% of shale potassium is volatilized and combined with chlorine.

In 1972—1983 several pulverized oil-shale fired boilers were reconstructed for low-temperature combustion: BKZ-75-39FSL boilers for low-temperature vortex (LTV) burning and for fluidized-bed combustion system (torch-fluidized burning) and a TP-17 boiler also for LTV burning. The LTV furnaces are cooled by plate superheater sections (panels) placed in furnaces (Fig. 3). For cooling the fluidized-bed furnace steam-generating and superheater tubes mounted in the fuel bed are used (Fig. 4).

Coarse grinding of oil shale and the decrease in the temperature in the furnaces by 150—250 K has resulted in the decrease in intensity of fouling the boiler heat surfaces with ash deposits. But the lag in the development of the theory of behaviour and interactions of alkali, alkaline earth-chlorine and sulfur compounds in fuel burning processes restrains one from making satisfactory generalizations about the real effects of low-temperature combustion in boiler furnaces.

*Academy of Sciences of the Estonian SSR
Tallinn*