

**НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ СЖИГАНИЯ УГЛЕЙ
КАНСКО-АЧИНСКОГО БАСЕЙНА
В КРУПНЫХ КОТЕЛЬНЫХ УСТАНОВКАХ**

И. К. ЛЕБЕДЕВ, Н. В. ТРИКАШНЫЙ

(Представлена научным семинаром кафедры котлостроения
и котельных установок)

Угли Канско-Ачинского бассейна обладают двумя отличительными особенностями: высокое содержание окиси кальция в золе и резкопеременные температурные и вязкостные характеристики золы в зависимости от зольности. При сжигании этих углей в топочных устройствах открытого типа с сухим шлакоудалением крупных котельных агрегатов электростанций возникает ряд трудностей, главными из которых являются образование связанных отложений на конвективных поверхностях нагрева, находящихся в зоне температур газов 800—1000°C, и шлакование радиационных поверхностей нагрева, расположенных в топочной камере.

На основе изучения структуры и характера образования связанных отложений на конвективных поверхностях нагрева котельных агрегатов, сжигающих угли Канско-Ачинского бассейна, возник ряд гипотез о механизме протекания этого явления.

Большинство исследователей считает, что в основе этого механизма лежит появление в золе низкоплавких компонентов, придающих частицам золы клейкость при температурах золы 850—1000°C. Такими компонентами могут быть либо сульфидно-сульфатные сплавы кальция (Томский политехнический институт, ВТИ), либо низкотемпературные силикаты (Таллинский политехнический институт). Другие исследователи (ОРГРЭС) считают, что в основе механизма образования связанных отложений лежит агломерация и сепарация тонких фракций золы на поверхности нагрева с последующим их спеканием при сульфатизации в потоке дымовых газов.

Практика сжигания Канско-Ачинского бассейна в топочных устройствах различных конструкций показала, что процесс образования связанных отложений может быть полностью ликвидирован, или интенсивность протекания этого процесса значительно уменьшена при сжигании углей в высокофорсированных топочных устройствах с жидким шлакоудалением при организации высокотемпературного процесса горения и при высокотемпературной обработке всей массы золы в процессе сжигания. Теоретические и экспериментальные исследования, проводимые в лабораториях, также показывают, что высокотемпературная обработка золы в процессе сжигания Канско-Ачинских углей является полезной с точки зрения всех существующих в настоящее время гипотез об образовании связанных отложений и может привести к прекращению этого весьма нежелательного явления.

На основании данных практики сжигания углей Канско-Ачинского бассейна в топочных устройствах различных конструкций, теоретических и экспериментальных исследований отложений и летучей золы на сегодня можно сделать следующие выводы.

1. Сжигание углей Канско-Ачинского бассейна следует производить при высоких температурах, обеспечивающих высокотемпературную обработку всей или большей части золы в процессе сжигания.

2. Уровень высокотемпературного сжигания и высокотемпературной обработки золы должен быть не ниже 1450—1500°C.

3. Конструкция топочных устройств для сжигания углей Канско-Ачинского бассейна должна обеспечивать равномерные высокопотенциальные температурные поля в камере горения, исключаяющие низкотемпературные зоны горения.

4. В целях интенсификации физико-химических процессов, протекающих при высокотемпературной обработке, вся зола в топочном процессе должна проходить через стадию расплавления, а топки должны сооружаться с жидким шлакоудалением.

5. В конструкции топочных устройств должны быть выделены в предтопки зоны горения с утепленными поверхностями нагрева, в которых должно происходить по возможности полное завершение всех процессов горения.

Все выводы, высказанные нами, обсуждались и были одобрены на научно-технических совещаниях, а также в периодической печати и сейчас вряд ли у кого вызывают сомнение. Поэтому в настоящей статье мы хотели бы рассмотреть вопрос о том, насколько и при каких условиях можно выполнить на практике сформулированные требования.

В настоящее время нет единого мнения по оценке пригодности твердых топлив для их сжигания в топках с жидким шлакоудалением. Различные формы и научные организации на основании опыта сжигания различных топлив с жидким шлакоудалением дают различные рекомендации, подробно изложенные в литературе [1, 2, 3, 4]. На основании анализа опыта работы топков с жидким шлакоудалением ФРГ, США и отечественной энергетики д. т. н. Ю. Л. Маршак дает следующие зависимости, определяющие пригодность твердых топлив для сжигания их в топках с жидким шлакоудалением

$$\vartheta_a = a_x t_{\mu=250} + b_x, \quad (1)$$

$$t_0 < t_{\mu=250}. \quad (2)$$

Здесь ϑ_a — теоретическая температура горения, °C;

t_0 — критическая температура вязкостной характеристики, °C;

$t_{\mu=250}$ — температура шлака при вязкости 250 пз, °C;

a_x, b_x — коэффициенты, зависящие от типа топки, вида топлива, температуры горячего воздуха и схемы сушки топлива.

Как видно из этих уравнений, шлак должен удаляться из топки при вязкости 250 пз, а температура кристаллизации шлака t_0 должна быть ниже температуры, при которой происходит удаление шлака.

Эти рекомендации не применимы к углям Канско-Ачинского бассейна, так как в большинстве случаев (за исключением высокозольных углей Назаровского месторождения) шлаки в поворотных критических точках имеют вязкость ниже 100 пз.

Поэтому для оценки возможности сжигания различных углей Канско-Ачинского бассейна нами произведены следующие расчеты.

Тепловой баланс топки выразим следующим уравнением:

$$\psi_{к.г} B_p (Vc)_a \vartheta_a = B_p (Vc)_m \vartheta_m'' + qH, \quad (3)$$

где q — величина теплового потока через шлаковую пленку на поверхностях камеры горения, $\text{ккал}/\text{м}^2 \text{ час}$;

H — поверхность камеры горения, м^2 ;

$\Psi_{\text{к.г.}}$ — степень выгорания топлива в камере горения.

Остальные величины обозначены в соответствии с нормативным методом теплового расчета котельных агрегатов [5].

Решая уравнение (3) относительно ϑ_m'' и вводя несложные преобразования, получим

$$\vartheta_m'' = \Psi_{\text{к.г.}} \vartheta_a \frac{(Vc)_a}{(Vc)_m} \left(1 - \frac{q}{\Psi_{\text{к.г.}}} \frac{H}{V_{\text{к.г.}}} \frac{1}{\left(\frac{Q}{V}\right)_{\text{к.г.}}} \frac{Q_p^p}{Q_m} \right) \text{°C}, \quad (4)$$

где $\frac{H}{V_{\text{к.г.}}}$ — величина поверхности камеры горения, отнесенная к ее объему $\text{м}^2/\text{м}^3$;

$\left(\frac{Q}{V}\right)_{\text{к.г.}}$ — видимое теплонепределение камеры горения, $\text{ккал}/\text{м}^3 \text{ час}$;

Q_p^p — располагаемое тепло топлива, $\text{ккал}/\text{кг}$;

Q_m — суммарное тепловыделение камеры горения, $\text{ккал}/\text{кг}$.

Абсолютная температура камеры горения будет

$$T_m'' = \vartheta_m'' + 273 \text{°K}, \quad (5)$$

примем

$$\frac{(Vc)_a}{(Vc)_m} \simeq 1,$$

тогда, после несложных преобразований, уравнение (5) можно представить в виде:

$$T_m'' = \Psi_{\text{к.г.}} T_a \left[(1 - K) \left(1 - \frac{273}{T_a} \right) + \frac{273}{T_a} \right] \text{°K}, \quad (6)$$

где

$$K = \frac{q}{\Psi_{\text{к.г.}}} \frac{H}{V_{\text{к.г.}}} \frac{1}{\left(\frac{Q}{V}\right)_{\text{к.г.}}} \frac{Q_p^p}{Q_m}.$$

При расчетах лучистого теплообмена в топочной камере эффективную температуру излучающего факела принимают [6]

$$T_{\text{ф}} = 0,91 \sqrt{T_a T_m''} \text{°K}. \quad (7)$$

Подставляя значение T_m'' из уравнения (6) в уравнение (7), получим

$$T_{\text{ф}} = 0,91 T_a \sqrt{\Psi_{\text{к.г.}}} \sqrt{(1 - K) \left(1 - \frac{273}{T_a} \right) + \frac{273}{T_a}} \text{°K}. \quad (8)$$

Для оценки теплового потока через шлаковую стенку воспользуемся методом, разработанным д. т. н. Ю. Л. Маршаком. Этот метод основан на рассмотрении равенства тепловых потоков от факела к текущей шлаковой пленке и через шлаковую пленку определенной толщины и теплопроводности. При этом толщина шлаковой пленки определяется на основании рассмотрения движения жидкого шлака как вязкой жидкости [3].

Величина теплового потока от факела к шлаковой пленке определялась путем совместного решения уравнений

$$\left. \begin{aligned}
 q &= 4,9 \cdot 10^{-8} \alpha_k [T_{\text{ф}}^4 - T_{\text{п}}^4] + \alpha_k [T_{\text{ф}} - T_{\text{п}}] \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{час} \\
 \text{и} \\
 q &= \frac{\bar{\lambda}_{\text{шл}}^3 \sqrt{2(e^{\varphi_{\text{шл}} \Delta t} - 1) - 2\varphi_{\text{шл}} \Delta t_{\text{шл}} - (\varphi_{\text{шл}} \Delta t)^2}}{\varphi_{\text{шл}} \sqrt{\frac{\mu_0 G_0 \gamma_{\text{шл}}}{\gamma_{\text{шл}}^2 U \sin \alpha}}}
 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Здесь α_k — степень черноты топки, принятая равной 0,63 [3];
 $T_{\text{ф}}$, $T_{\text{п}}$ — эффективная температура факела и шлаковой пленки, соответственно, °К;

$\varphi_{\text{шл}} = \frac{\ln \frac{\mu}{\mu_0}}{\Delta t}$ — характеристика вязкости шлака по [3];

T_0 — критическая температура шлака (температура в поворотной точке), °К;

μ_0 — вязкость шлака в поворотной точке, кг/м²сек;

G_0 — количество золы, внесенной в топку, кг/сек;

$\bar{\lambda}_{\text{шл}}$ — средняя теплопроводность шлака в пределах температур от $T_{\text{п}}$ до T_0 , ккал/м.час.град;

$\Delta t = T_{\text{п}} - T_0$

$\gamma_{\text{шл}}$ — уд. вес шлака, кг/м³;

U — периметр стен, по которым стекает шлаковая пленка, м;

α — угол наклона стенки к горизонтали °;

$\eta_{\text{шл}}$ — коэффициент шлакоулавливания.

Расчеты производились применительно к конструкции предтопок котла БКЗ—320—140, при этом принято $\eta_{\text{шл}} = 0,4$

$U = 33,2$ м для вертикальных стен и

$U = 5,6$ м для периметра летки; $\alpha = 15^\circ$.

Коэффициент теплопередачи конвекции от газов к шлаковой пленке α_k определен из уравнения [3]

$$Nu = 0,0036 Re. \quad (10)$$

Расчеты производились для трех видов шлаков: для шлаков назаровского угля со средней зольностью, для которых $A^c = 10,62\%$, $\mu_0 = 38$ нз, $\varphi_{\text{шл}} = 0,00955$, $t_0 = 1227^\circ\text{C}$, для шлаков назаровского угля с повышенной зольностью $A^c = 30,06\%$, $\mu_0 = 220$ нз, $\varphi_{\text{шл}} = 0,00717$, $t_0 = 1427^\circ\text{C}$ и для низкозольного березовского угля, для которого принималось $A^c = 4\%$, $\mu_0 = 10$ нз, $\varphi_{\text{шл}} = 0,01$, $t_0 = 1627^\circ\text{C}$. Результаты расчета температур на поверхности шлаковой пленки и тепловых потоков через шлаковую пленку для одного из рассмотренных углей приведены на рис. 1*.

Далее принимали за нормальную температуру вытекания шлака температуру, превышающую на 50—100°С температуру в поворотной точке вязкостной характеристики, по кривым рис. 1 находили эффективную температуру факела и величину тепловых потоков через шлаковую пленку, а затем по уравнению (8) определялась необходимая температура горения. Применительно к конструкции предтопок котла

БК—320—140 принималось $\frac{H}{V_{\text{кг}}} = 0,7$, $\frac{Q_{\text{п}}}{Q_{\text{м}}} = 0,9$, $\Psi_{\text{к.г.}} = 0,9$. Расчетное значение q для подстановки в уравнение (8) принималось по формуле

* Аналогичные кривые были построены для расчетов с другими топливами.

$$q = \frac{q_v H_v + q_{\text{под}} H_{\text{под}}}{H_v + H_{\text{под}}}, \quad (11)$$

где

q_v и $q_{\text{под}}$ — тепловые потоки через шлаковую пленку на вертикальных стенах и на поду, соответственно, $\text{ккал}/\text{м}^2 \text{ час}$;

H_v , $H_{\text{под}}$ — величина поверхности вертикальных стен и пода, соответственно, м^2 .

Результаты расчетов приведены в табл. 1.

Из приведенной таблицы видно, что для обеспечения нормального вытекания жидкого шлака из летки при сжигании назаровских углей со средней зольностью температура факела вблизи летки должна поддерживаться в пределах $1300\text{--}1400^\circ\text{C}$, а теоретическая температура горения — в пределах $1550\text{--}1750^\circ\text{C}$. Такие температуры легко могут поддерживаться как при прямом вдувании пыли сушильным агентом, так и в топочных устройствах, снабженных системами пылеприготовления с разомкнутой и полуразомкнутой схемой сушки топлива. Но при этих температурах не будет обеспечиваться нужная высокотемпературная обработка золы. Поэтому температуры в топочной камере должны поддерживаться выше $1300\text{--}1400^\circ\text{C}$, в соответствии с чем перегрев шлака будет больше, а системы пылеприготовления должны быть либо с полуразомкнутой, либо с разомкнутой схемой сушки.

При сжигании назаровского угля с повышенной зольностью для поддержания жидкого шлака температура вблизи летки, как видно из табл. 1, должна быть в пределах $1500\text{--}1600^\circ\text{C}$, а теоретическая температура горения должна быть соответственно — $1730\text{--}1900^\circ\text{C}$. В этом случае в открытой топке с прямым вдуванием уже нельзя будет получить нормального вытекания жидкого шлака и потребуются только применение топок с предтопками и разомкнутой или полуразомкнутой схемой сушки.

Эти положения будут справедливы для углей Ирша-Бородинского месторождения и для углей Березовского месторождения с зольностью не ниже $A^c = 5,5\%$, постольку, поскольку вязкостные характеристики золы этих углей близки к вязкостным характеристикам назаровских углей.

Что касается березовских углей с зольностью ниже $A^c = 5,5\%$, то, как видно из табл. 1, для нормального вытекания жидкого шлака необходимо иметь температуру факела вблизи летки $1800\text{--}1950^\circ\text{C}$, а теоретическая температура горения должна быть в пределах $2350\text{--}2800^\circ\text{C}$. В современных конструкциях топок с жидким шлакоудалением нельзя получить таких температур даже при разомкнутой схеме сушки, так как влажность готовой пыли по условиям взрывобезопасности должна находиться в пределах

$$W_{\text{пл}} = W_{\text{ги}} + 8 = 22,5\%$$

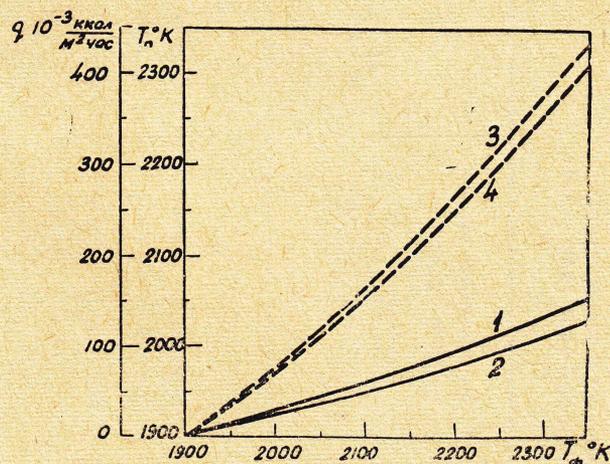


Рис. 1. Зависимость температуры на поверхности шлаковой пленки и теплового потока через пленку от температуры факела. Березовский уголь, $A^c = 4\%$, $\mu_0 = 10$, $p_3 = 1900^\circ\text{C}$, $\psi_{\text{мп}} = 0,01$:

1 — температура поверхности шлаковой пленки на поду; 2 — температура поверхности шлаковой пленки на вертикальных стенах; 3 — тепловой поток через шлаковую пленку вертикальных стен; 4 — тепловой поток через шлаковую стенку

Таблица 1

Результаты подсчета теоретической температуры горения и температуры
вблизи летки для обеспечения жидкого шлакоудаления при сжигании углей
Канско-Ачинского бассейна

Уголь	Ас %	$q \cdot 10^{-3}$		Расчетная величина $q \cdot 10^{-3}$ ккал/м ² час	Температура вблизи шлакозой летки		Теоретическая темпе- ратура горения		$m = \frac{\partial \phi}{\partial a}$	$\Delta T_{\phi} = T_{\phi} - T_{\Pi}$	$\Delta T_{\Pi} = T_{\Pi} - T_0$
		верт стен	пода		T_{ϕ} , °К	ϑ_{ϕ} , °С	T_a , °К	ϑ_a , °С			
$\Delta T = T_{\Pi} - T_0 = 50^{\circ}$											
Назаровский	10,62	32	30	25,97	1590	1317	1820	1547	0,850	40	50
Назаровский	30,06	20	10	18,25	1762	1489	2005	1722	0,867	12	50
Березовский	4,0	134	126	132,13	2070	1797	2620	2347	0,765	120	50
$\Delta T = T_{\Pi} - T_0 = 100^{\circ}$											
Назаровский	10,62	74	50	68,39	1684	1411	2018	1745	0,810	84	100
Назаровский	30,06	42	22	37,3	1826	1553	2154	1881	0,827	26	100
Березовский	4,00	285	266	280,56	2220	1947	3080	2807	0,79	220	100
$q_c \cdot 10^{-3} = 120$ ккал/м ² час											
Назаровский	10,62	120	83	111,35	1778	1505	2192	1919	0,785	153	125
Назаровский	30,06	120	61	106,2	2010	1737	2430	2207	0,788	70	240
Березовский	4,0	120	112	118,13	2054	1781	2557	2284	0,780	110	44

Исходя из результатов проведенных выше расчетов, могут быть выбраны три возможные направления.

1. Ограничение зольности выдаваемого из карьера березовского угля зольностью $A^c = 6\%$, что было рекомендовано совещанием в ВТИ в марте 1967 г. При этом проектом карьера должна быть предусмотрена такая технологическая схема, которая предусматривала бы либо перемешивание высокозольных углей с низкозольными, либо подмешивание к низкозольным углям с зольностью ниже $A_c = 6\%$ кремнесодержащих пород с подошвы или крыши пласта, с обязательным надежным контролем зольности угля, выдаваемого из карьера.

Вторым возможным решением может быть поддержание зольности угля, сжигаемого в котлоагрегатах, выше $A^c = 6\%$ путем подмешивания к низкозольным березовским углям высокозольных углей Назаровского месторождения в системе топливоотдачи электростанций. Этот путь, упрощая технологическую схему добычи угля, вызывает некоторые осложнения в схеме топливоснабжения станции, но вполне практически возможен.

Третьим возможным направлением является создание специальных котельных агрегатов, в топочных устройствах которых возможно получение жидкого шлака для широкой гаммы углей Канско-Ачинского бассейна. Но следует указать на то, что создание таких агрегатов будет связано с решением ряда проблем, которые еще не встречались ни в отечественной, ни в зарубежной теплоэнергетике. К таким проблемам относятся: проблема высокого подогрева воздуха, либо применение обогащенного кислородом дутья для повышения теоретической температуры горения, создание конструкций утепленных поверхностей нагрева, обеспечивающих надежность работы в условиях высоких температур и надежное утепление предтопок в целях сокращения теплового потока.

В некоторых работах [7] указывается и на возможность увеличения сублимации минеральной части топлива, что может сказаться на увеличении загрязнений поверхности нагрева. Но эта проблема, видимо, будет иметь значение при более высоких температурах, чем рассматриваемые нами.

Решение проблем, связанных с созданием новых типов котлоагрегатов, потребует значительного времени, а освоение угольных богатств уникального угольного Канско-Ачинского бассейна является делом сегодняшнего дня, поэтому при развитии энергетики на базе углей Канско-Ачинского бассейна в нашем распоряжении остаются два первых направления.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Н. Лебедев, С. Н. Мионов, Ю. Л. Маршак. Область применения топок с жидким шлакоудалением и их тепловая экономичность. Сб. «Повышение параметров пара и мощности агрегатов в энергетике», Госэнергоиздат, М.—Л., 1961.
2. У. Х. Роуэнд, Д. У. Кеслер. Технический прогресс в конструкциях паровых котлов компании Бабкок Вилькокс (США). Материалы V конгресса Мировой Энергетической конференции, том 1, Изд. ЦБТИ машиностроения. М., 1958.
3. Ю. Л. Маршак. Топочные устройства с вертикальными циклонными предтопками. Изд. «Энергия», М.—Л., 1966.
4. А. Н. Лебедев, Г. А. Шейнин. Шлакование пылеугольных топок и борьба с ним. Изд. «Энергия», М.—Л., 1966.
5. Тепловой расчет котельных агрегатов. Нормативный метод. ГЭИ, М.—Л., 1957.
6. Проект новых норм теплового расчета котельных агрегатов.
7. С. А. Тагер. Проблемы современной топочной техники и задачи научных исследований. «Теплоэнергетика», № 9, 1955.