

Радиационный теплообмен в слоевых топках

Каменецкий Б. Я., канд. техн. наук
ГНУ ВИЭСХ, Москва

Рассмотрен вклад излучения топочных газов и поверхности горящего слоя в теплообмен с настенными экранами в слоевых топках. Приведены результаты измерений химического состава и температуры газовой среды, температуры поверхности слоя и тепловых потоков в топках при слоевом сжигании антрацита, каменных и бурых углей.

Ключевые слова: стадии горения, фракции твердого топлива, неравномерное горение в слое, ручная слоевая топка, топочный цикл, температура слоя и топочных газов, химический состав топочных газов, прозрачность газовой среды, локальный и интегральный теплообмен.

Экспериментальные результаты, приведенные в [1, 2], свидетельствуют о принципиальных отличиях процесса теплообмена в слоевых топках от теплообмена в камерных топках при факельном сжигании газообразного и пылевидного топлива. Это обусловлено наличием слоя горящего топлива, излучение поверхности которого играет главную роль в топочном теплообмене. В существующих методах расчета топочного теплообмена не учитывается различный механизм излучения газов и твердых тел, игнорируется различие температур газов и поверхности слоя. Поэтому эти методы неприменимы для слоевых топок, что и выявилось в опытах.

При слоевом процессе большая часть топлива сгорает в пределах слоя, в нем выделяется основное количество теплоты, поэтому слой разогревается до наибольших температур в системе тел, участвующих в теплообмене. В качестве примера на рис. 1 показано распределение температур по высоте слоя горящего угля, топочных газов над слоем, поверхности кирпичной кладки и топочных экранов топки котла при теплотехнических испытаниях на каменном угле марки 2СС. В данном опыте теплонапряжение зеркала горения $BQ_H/R = 0,32 \text{ МВт/м}^2$, коэффициент избытка воздуха в топочных газах $\alpha = 1,5$ (B и Q_H — часовой расход и низшая теплота сгорания топлива, R — площадь поверхности слоя или колосниковой решетки).

Температура в слое (до 1400°C) снижается на его поверхности из-за теплоотдачи к поверхности топочных экранов, имеющей температуру $120 - 160^\circ\text{C}$. Температура топочных газов в топке существенно ниже, чем температура слоя. Уменьшение ее по мере подъема газов вследствие конвективной теплоотдачи к экранам зависит от величины и расположения поверхностей нагрева. Диапазоны изменения температур слоя и газов, показанные на рисунке, отражают неравномерность процесса в течение топочного цикла (между соседними загрузками порций топлива на слой) при дискретной подаче, в данном опыте — через 10 мин.

Решающая роль излучения слоя в локальном теплообмене слоевой топки проявляется в характере распределения тепловосприятия топочных экранов относительно слоя, когда участки поверхности экранов, расположенные над слоем и примыкающие к нему, воспринимают наибольшие тепловые потоки. Интегральный теплообмен (общее тепловосприятие) в слоевой топке больше по сравнению с факельным сжиганием в этой же топке при одинаковом тепловыделении и возрастает при увеличении площади поверхности слоя R . По этим и другим результатам в [1, 2] сделан вывод, что излучение поверхности слоя топлива является основным и определяет интенсивность топочного теплообмена, а роль топочных газов незначительна и

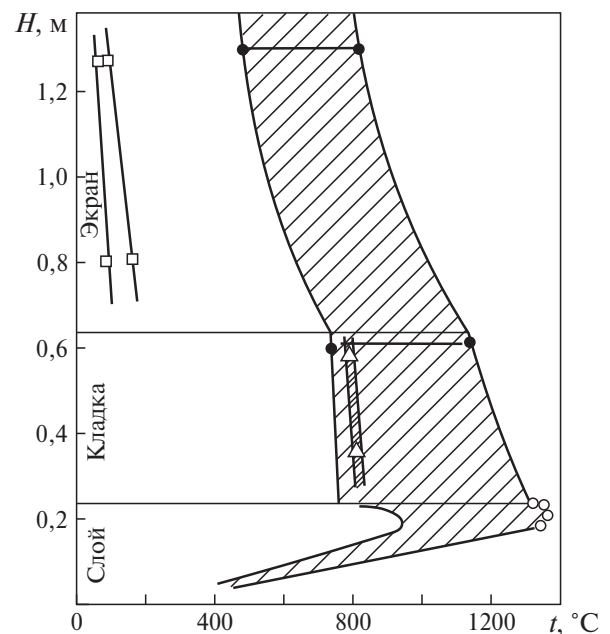


Рис. 1. Графики снижения температур по высоте слоя каменного угля и над слоем ($\alpha = 1,5$, $BQ_H/R = 0,32 \text{ МВт/м}^2$, продолжительность топочного цикла $T_{ц} = 10$ мин, минимальные значения — при забросе порции, максимальные — в первой половине топочного цикла):

○ — слой; ● — газы; △ — кирпичная кладка; □ — экраны

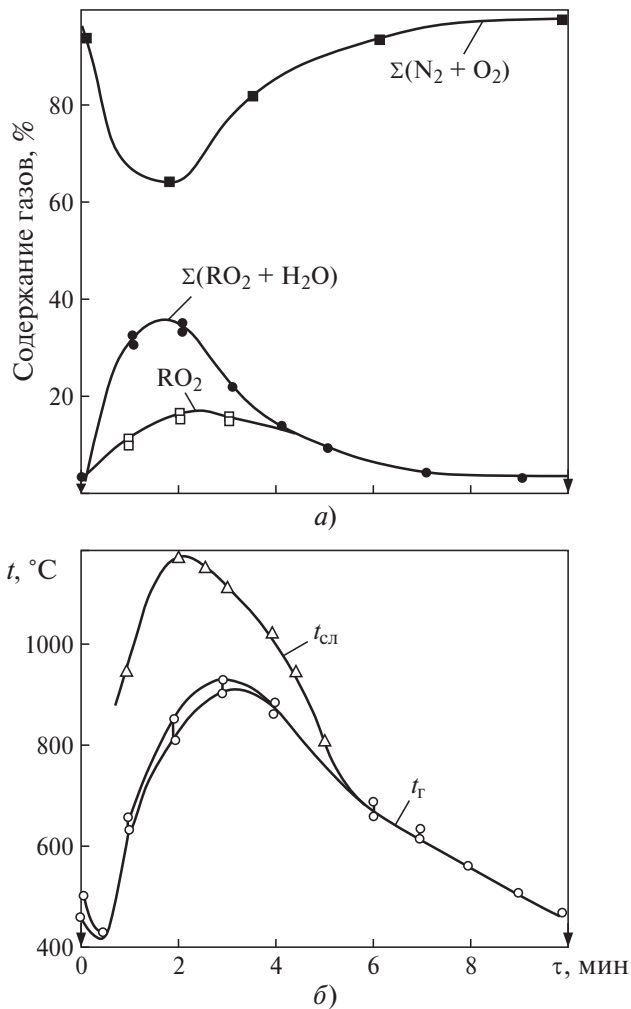


Рис. 2. Графики изменения химического состава топочных газов (а) и температуры поверхности слоя $t_{сл}$ и топочных газов t_g (б) в течение цикла при сжигании бурого подмосковного угля (влажность $W_p = 33\%$, летучие — 45% , $\alpha = 1,8$, $BQ_H/R = 0,33 \text{ МВт/м}^2$):

↓ — моменты заброса порции угля

сводится практически к конвективной теплоотдаче к экранам.

Дополнительную информацию о соотношении теплоотдачи излучением поверхности слоя топлива и газовой среды топки может дать анализ радиационных свойств газовой среды, зависящих от химического состава топочных газов. Изучению этого вопроса при сжигании антрацита, каменного и бурого углей посвящена данная статья.

Для анализа использованы данные измерений химического состава газообразных продуктов сгорания, температур слоя и топочных газов, тепловых потоков экранов, проводившихся при теплотехнических испытаниях секционных водогрейных котлов мощностью до 1,5 МВт с ручными и механическими слоевыми топками [1–3]. В ручных топках кусковое топливо забрасывали на слой равными порциями через одинаковые промежутки времени. Очаговые ос-

татки удаляли через 6–8 работы котла, когда высота слоя достигала 0,3 м. В механических топках подача угля и сброс шлака осуществлялись периодически при движениях шурующей планки.

Состав сухих уходящих газов (содержание двуокиси углерода и серы, кислорода, водорода, угарного газа, метана) измеряли газоанализаторами, температуру слоя — оптическим пирометром и термопарными зондами, температуру топочных газов — термопарным зондом, температуру воды на входе и выходе топочных экранов — образцовыми термометрами в гильзах. При измерении температуры слоя пирометром определяли наибольшую и наименьшую температуры поверхности, на которой имелись более и менее яркие участки. Количество водяных паров в топочных газах рассчитывали по измеренной влажности топлива.

Результаты выявили существенную неравномерность процессов сгорания топлива и теплообмена в течение топочного цикла (между соседними загрузками порций угля). Неравномерность процесса сгорания, органически присущая ему, — это следствие того, что фракции топлива, попавшие на горячий слой, последовательно проходят стадии подготовки (нагрева, испарения влаги, выделения летучих компонентов) и горения кокса. Резкие изменения потребности в воздухе для горения, тепловыделения, химического состава топочных газов, температуры слоя и газов в течение каждого топочного цикла особенно велики для бурых углей, имеющих высокую влажность (до 55%) и большое содержание летучих (до 60%).

Опыты с бурым подмосковным углем проводили в прямоугольной топке с площадью зеркала горения (колосниковой решетки) $R = 1,7 \text{ м}^2$ и высотой над слоем 1,6 м. На рис. 2, а показано изменение содержания двухатомных газов (азота N_2 и кислорода O_2) и трехатомных газов RO_2 (суммы водяных паров H_2O , углекислого и серного газов) в продуктах сгорания при продолжительности топочного цикла $T_{ц} = 10$ мин, массе порций угля по 30 кг. Здесь стадии прогрева фракций, испарения влаги и выделения летучих скоротечны, они начинаются сразу после заброса угля и проходят при относительно невысоких температурах. Интенсивное горение летучих и соответствующий рост тепловыделения приводят к быстрому разогреву слоя и газов. Уже ко 2-й минуте топочного цикла содержание трехатомных газов (в основном углекислоты CO_2 и водяных паров) достигает 38%. В этот период газовая среда в топке непрозрачная.

При средней расчетной скорости сгорания угля в этом опыте 2,9 кг/мин наибольшая скорость сгорания достигает 5 кг/мин ко 2-й ми-

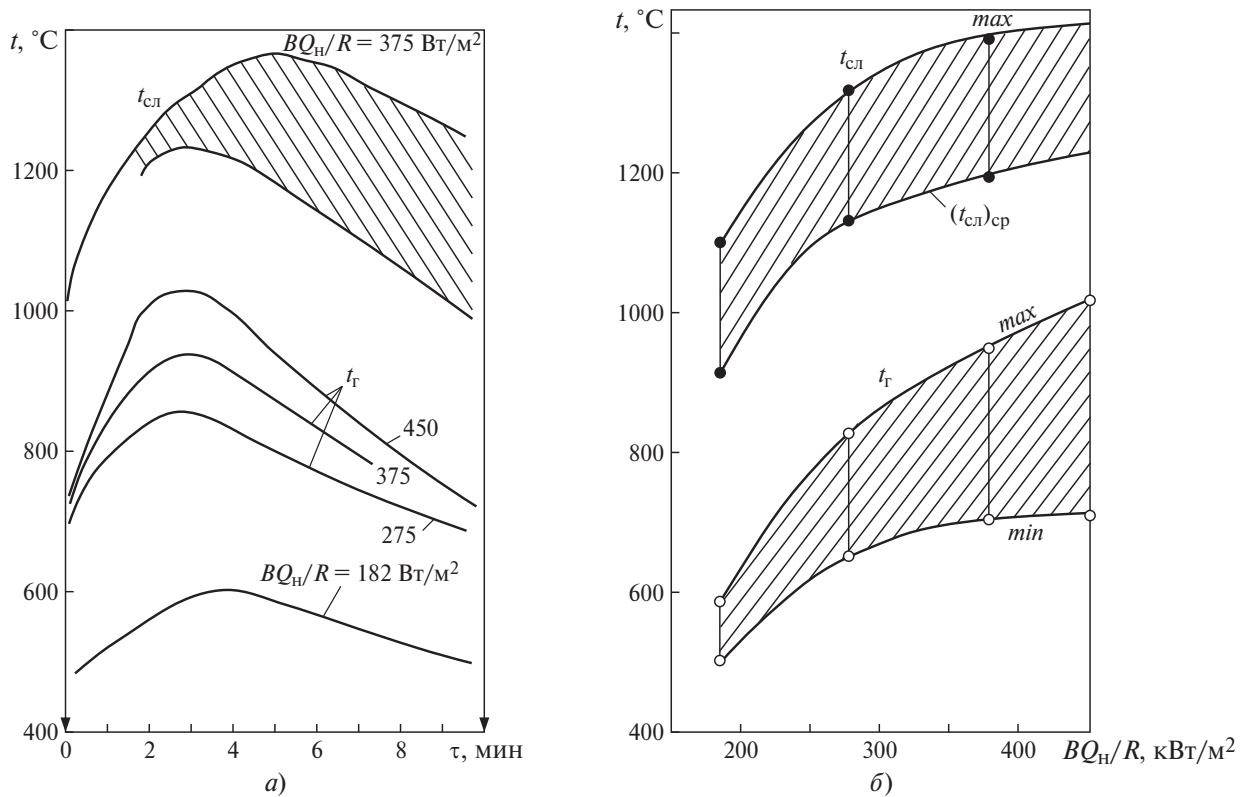


Рис. 3. Графики изменения температур поверхности слоя $t_{сл}$ и газов над слоем $t_г$ в течение топочного цикла (а) и в зависимости от тепловой нагрузки (б); топливо — каменный кузнецкий уголь марки 2СС, $R = 2,2 \text{ м}^2$, $\alpha = 1,5 \div 1,6$:

заштрихованные зоны — диапазоны изменения температур в топочных циклах; ↓ — моменты заброса порции угля

нуге цикла за счет летучих (расчет по локальному газовому составу). В этот момент вследствие максимальных скорости сгорания и тепловыделения температуры слоя и газов (см. рис. 2, б) максимальны (1200 и 900 °С соответственно). Затем, когда выделение и сгорание летучих заканчивается, происходит окисление кокса, уменьшаются тепловыделение, температура и содержание трехатомных газов, а содержание двухатомных газов (в основном азота и кислорода) возрастает и во второй половине цикла достигает 90 – 95 %. В этот период газовая среда в топке становится прозрачной, и теплообмен до конца топочного цикла определяется излучением поверхности слоя и конвекцией газов.

Другой крайний случай теплообмена в слоевой топке — при сжигании антрацита, содержащего минимальное количество влаги (5 %) и летучих (4 %). Поэтому здесь неравномерность процесса горения, тепловыделения и теплообмена наименьшая. Поскольку практически все топливо сгорает в слое, он разогревается до наибольших температур даже при значительных избытках воздуха. Так, при избытке воздуха в топочных газах $\alpha = 2,2$ температура поверхности слоя достигает 1400 °С. Топочная камера служит камерой охлаждения газообразных продуктов сгорания. При этом газовая среда в топке прозрачна (диатермична) в течение практически

всего топочного цикла, что дает основание для расчета теплообмена с топочными экранами по выражению Стефана – Больцмана с использованием значений температур поверхности слоя и экранов в четвертой степени [4, 5]. Существенное значение в теплообмене имеет площадь поверхности слоя R . Трудность такого расчета заключается в сложности определения температуры слоя, которая зависит от теплонапряжения зеркала горения, избытка воздуха, площади поверхности нагрева и слоя.

Теплообмен при сжигании каменных углей — промежуточный случай. На рис. 3 показаны изменение температуры поверхности слоя в топочных циклах и рост ее с тепловой нагрузкой при сжигании кузнецкого угля марки 2СС в слоевой топке с площадью поверхности слоя $2,2 \text{ м}^2$ и высотой топки 1,7 м. Широкая область температур слоя, измеренная оптическим пирометром, связана с неоднородностью слоя, на поверхности которого существуют яркие и темные участки.

С увеличением тепловой нагрузки и продолжительности топочного цикла температурный уровень слоя и топочных газов и диапазон колебаний температур в топке возрастают. При теплонапряжении зеркала горения $BQ_{н}/R = 0,45 \text{ МВт/м}^2$ максимальная температура поверхности слоя достигает 1420 °С при коэффи-

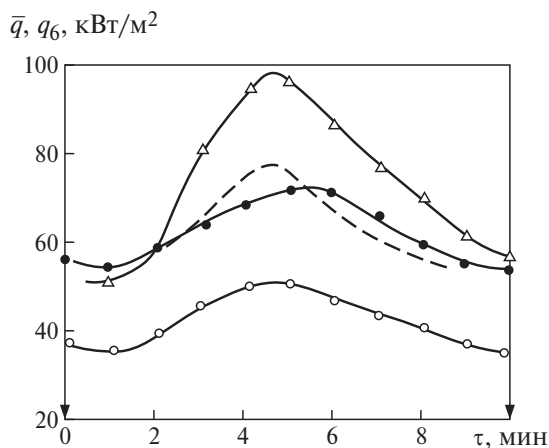


Рис. 4. Графики изменения тепловых потоков экранной топочной панели котла в течение топочного цикла (топливо — каменный уголь марки 2СС, $R = 2,24 \text{ м}^2$, $\alpha = 1,5$):

○ — средний поток по девяти экранным панелям; ● — тепловой поток панели № 6; △ — локальный поток панели № 6; - - - - — расчет по приведенной в статье формуле; ↓ — моменты заброса порций угля

коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1,45 \div 1,5$, а температура топочных газов над слоем — $1050 \text{ }^\circ\text{C}$. Адиабатная температура t_a , рассчитанная для случая отсутствия теплообмена в топке, значительно выше: для используемого угля она составляет $1580 - 1600 \text{ }^\circ\text{C}$. Различие между t_a и температурой слоя особенно велико (до $600 \text{ }^\circ\text{C}$) при низких нагрузках, что подтверждает условность применения температуры t_a в расчетах топочного теплообмена.

В рассмотренных условиях проявилась положительная роль кирпичной кладки котлов. Ее внутренняя поверхность нагревается до $750 - 800 \text{ }^\circ\text{C}$ при высоких теплонапряжениях, и вследствие тепловой инерции температура ее мало изменяется в течение топочных циклов (см. рис. 1). Поэтому в моменты заброса свежих порций топлива температура поверхности кладки оказывается самой высокой в системе, что приводит к изменению направления тепловых потоков на поверхности слоя. В результате свежее топливо, воспринимая излучение от кладки, быстрее прогревается и воспламеняется.

Тепловосприятие и тепловые потоки топочных экранов удалось измерить при испытаниях секционного водогрейного котла, имеющего девять экранных панелей с автономным питанием, обрамляющих фронт, потолок и тыл прямоугольной топочной камеры длиной 3 м и высотой 1,7 м [1, 2]. Результаты измерений средних тепловых потоков всей топочной поверхности, средних и локальных потоков экранной панели № 6, расположенной непосредственно над слоем, в опыте при $B = 150 \text{ кг/ч}$ представлены на рис. 4. Из-за тепловой инерции и запаздывания максимумы тепловых потоков зафиксированы на 5-й минуте 10-минут-

ного топочного цикла. Спад тепловых потоков на 2-й минуте цикла после заброса порции угля связан с закрытием поверхности слоя свежим углем. Теплоотдача топочных газов при работе на каменных углях составляет $8 - 10 \%$ от всего тепловосприятия топочных экранов.

В данном опыте сделана попытка расчетной оценки локальных тепловых потоков q экранной панели № 6 по закону Стефана — Больцмана исходя из локальных осредненных по поверхности температур слоя:

$$q = C_{\text{пр}} \sigma [(T_{\text{сл}}/100)^4 - (T_{\text{э}}/100)^4] R/r^2,$$

где $C_{\text{пр}}$ — приведенный коэффициент излучения системы; R — площадь поверхности слоя; r — расстояние от центра слоя до панели; $T_{\text{сл}}$ и $T_{\text{э}}$ — температуры слоя и экрана, К; постоянная $\sigma = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$.

В расчете принято: $R = 2,2 \text{ м}^2$, $r = 1,5 \text{ м}$, $C_{\text{пр}} = 0,7$, $T_{\text{э}} = 320 \text{ К}$, $T_{\text{сл}}$ — по данным рис. 3. Характер расчетной кривой, показанной на рис. 4 пунктиром, подобен характеру изменения измеренных тепловых потоков, и значения их близки. Это свидетельствует о применимости изложенного подхода к механизму радиационного теплообмена в слоевых топках.

Полученные результаты подтверждают решающую роль излучения поверхности слоя в топочном теплообмене, особенно при сжигании антрацита и каменных углей. В этих случаях появляется возможность расчета локальных тепловых потоков экранов по приведенному выражению. Сложность расчета теплообмена в топках заключается в том, что средняя и локальная температуры слоя известны лишь для определенного сорта топлива, заданных нагрузки, коэффициента избытка воздуха, момента топочного цикла. Поэтому в настоящее время средний теплообмен в слоевых топках целесообразно рассчитывать по зависимостям, обобщающим экспериментальные результаты [6].

Список литературы

1. Каменецкий Б. Я. О применимости нормативного метода расчета топочного теплообмена к слоевым топкам. — Теплоэнергетика, 2006. № 2.
2. Каменецкий Б. Я. Расчет теплообмена в топках при слоевом сжигании топлива. — Теплоэнергетика, 2008, № 5.
3. Методика определения номинальной теплопроизводительности котлов мощностью до 3 МВт. — М.: ОНТИ НИИСантехники, 1983.
4. Теория тепломассообмена. — М.: Высшая школа, 1979.
5. Конаков П. К., Филимонов С. С., Хрусталева Б. А. Теплообмен в камерах сгорания паровых котлов. — М.: ГЭИ, 1968.
6. Каменецкий Б. Я. Инженерный расчет теплообмена в слоевых топках. — Тепловые процессы в технике, 2013, т. 5, № 2.