

Закономерности выгорания твердого топлива в неподвижном слое

Каменецкий Б. Я., канд. техн. наук

Рассмотрены условия и закономерности сгорания бурого, каменного углей и антрацита в слоевых колосниковых топках с дискретной подачей топлива. Неравномерность и полнота выгорания порции топлива исследованы путем измерения тепловыделения, температуры и химического состава топочных газов в течение топочного цикла.

Ключевые слова: слоевые топки, каменные и бурые угли, антрацит, фракции, стадии процесса, химический состав продуктов горения, интенсивность горения.

Технология сгорания рядового (полифракционного) твердого топлива в слое на колосниковых решетках широко применяется в топках котлов небольшой мощности. Серьезным недостатком слоевых топок является большая химическая и механическая неполнота сгорания топлива (до 15 %) при высоких форсировках — теплонапряжениях зеркала горения (поверхности слоя). Это обстоятельство вынуждает ограничивать форсировку топок с ручным обслуживанием до 1 МВт/м^2 , механических топок — до $1,5 \text{ МВт/м}^2$.

Средняя интенсивность процессов горения топлива и тепломассообмена в слое определяется скоростью воздуха, пронизывающего слой в межкусковых каналах, однако кинетика процесса более сложная [1]. Принципиальной особенностью процесса горения твердого топлива является его поэтапный характер — прохождение каждой фракцией топлива последовательных этапов (стадий): прогрев, испарение влаги, выделение газообразных продуктов разложения топлива (летучие), воспламенение и горение выделенных газов, горение коксового остатка, озоление и выжиг шлака.

Продолжительность стадии прогрева зависит от размеров фракций и форсировки слоя, а на стадии выделения летучих интенсивность процесса определяется температурой [2]. В нижней части слоя струйки воздуха соответствуют расположению прозоров (отверстий) колосниковой решетки, в связи с чем ее конструкция (доля живого сечения, размер и расположение прозоров) оказывает определенное влияние на процесс. При набросе порции свежего топлива на горящий слой (так называемая встречная схема) обеспечивается относительно быстрое протекание стадий подготовки и воспламенения, поскольку поверхность фракций воспринимает тепловой поток как снизу от горящих кусков и частиц, так и сверху из топки излучением от нагретой кирпичной кладки. Вследствие стадийности процесса роль воздушной про-

дувки неоднозначна, поскольку потребность в воздухе на каждой стадии различна.

Следствием стадийного характера процесса горения в слоевых топках с дискретной подачей топлива стала существенная неравномерность выгорания топлива в слое по времени, экспериментально исследованная в [3]. При этом проявились резкие колебания тепловыделения в слое и температуры газов (с амплитудой до $1000 \text{ }^\circ\text{C}$) в течение каждого топочного цикла — времени между загрузками порций топлива. Для выяснения закономерностей выгорания твердого топлива в слое экспериментальные исследования [3, 4], направленные на решение практических задач повышения полноты сгорания топлива, продолжены. Их результаты изложены в настоящей статье. С целью обобщения результатов рассматривались твердые топлива разного геологического возраста — антрацит, каменный и бурый угли, отличающиеся элементарным составом, содержанием влаги и количеством летучих.

Интенсивность сгорания (количество сгоревшего топлива) в каждый момент топочного цикла в опытах со слоевыми топками котлов определяли в соответствии с разработанной методикой по результатам измерений локального химического состава газообразных продуктов сгорания. Они содержали продукты окисления углерода и серы — трехатомные газы $\text{RO}_2 = \text{CO}_2 + \text{SO}_2$, кислород O_2 , азот и газы неполного сгорания (окись углерода CO , водород H_2 , углеводороды C_mH_n). Химический состав определяли в пробах уходящих газов котла, а химический состав газов, покидающих слой топлива, рассчитывали с учетом присосов воздуха в топку и в газовый тракт котла, находящихся под разрежением, поскольку присосы воздуха разбавляли топочные газы, уменьшая долю RO_2 и увеличивая долю кислорода. В опытах также измерялись параметры, которые могли дать дополнительную информацию о происходя-

Показатель	Антрацит АС	Каменный кузнецкий уголь СС	Бурый подмосков- ный уголь Б2
Объем трехатомных газов v_{RO_2} , м ³ /кг	1,44	1,17	0,57
Объем воздуха $(v_{\text{в}})_0$ при $\alpha = 1$, м ³ /кг	7,18	5,92	2,98
Объем сухих газов $(v_{\text{с.г}})_0$ при $\alpha = 1$, м ³ /кг	7,12	5,89	2,92
Содержание $(\text{RO}_2)_{\text{max}}$ при $\alpha = 1$, %	20,2	19,0	19,2

щих процессах: расход воздуха, поступающего в слой, аэродинамическое сопротивление слоя топлива и шлака, температура в слое и газов в надслойной зоне.

При сгорании m кг топлива объем трехатомных газов $V_{\text{RO}_2} = mv_{\text{RO}_2}$, где v_{RO_2} — объем газов RO_2 при сгорании 1 кг топлива, зависящий от его химического состава. Содержание трехатомных газов в сухих продуктах сгорания (в уходящих газах) зависит от коэффициента избытка воздуха α , поэтому

$$\text{RO}_2 = V_{\text{RO}_2} / V_{\text{с.г}}(\alpha) = mv_{\text{RO}_2} / V_{\text{с.г}}(\alpha), \quad (1)$$

где $\alpha = v_{\text{в}} / (v_{\text{в}})_0$ — коэффициент избытка воздуха, равный отношению объема поступающего воздуха к теоретически необходимому объему воздуха для полного сгорания топлива.

Из соотношения (1) определяется локальное количество сгоревшего топлива в каждый момент топочного цикла

$$m = \text{RO}_2 V_{\text{с.г}} / v_{\text{RO}_2}. \quad (2)$$

В широком диапазоне изменения избытка воздуха объем сухих газов примерно равен объему воздуха, т. е. количество сгорающего угля пропорционально содержанию RO_2 и расходу воздуха:

$$m = \text{RO}_2 V_{\text{в}} / v_{\text{RO}_2}. \quad (3)$$

Для топок, работающих с уравновешенной тягой (с дутьевым вентилятором), расход воздуха постоянен: $V_{\text{в}} = m_{\text{ср}}(v_{\text{в}})_0(\alpha_{\text{ср}}) = m_{\text{ср}} V_{\text{RO}_2} / (\text{RO}_2)_{\text{ср}} = \text{const}$, и локальный расход топлива m пропорционален содержанию RO_2 :

$$m = m_{\text{ср}} \text{RO}_2 / (\text{RO}_2)_{\text{ср}}, \quad (4)$$

где индекс “ср” относится к средним показателям.

Удельные объемы воздуха и сухих газов при сгорании антрацита АС, каменного кузнецкого угля СС и бурого подмосковного угля Б2 приведены в таблице. Измерения

проводили при работе трех колосниковых топок с периодическим забросом порций топлива на слой:

1) **топка 1** с прямоугольной колосниковой решеткой площадью $R = 1,7 \text{ м}^2$ с долей живого сечения прозоров $\varphi = 0,2$, работающая в составе котла с уравновешенной тягой (с дутьевым вентилятором и дымососом) на сортированном буром подмосковном угле, который забрасывали равными порциями через одинаковые промежутки времени (топочный цикл) $T_{\text{ц}} = 10$ мин;

2) **топка 2** с прямоугольной решеткой площадью $R = 1,43 \text{ м}^2$, работающая в эксплуатационных условиях на естественной тяге дымовой трубы (без дутьевого вентилятора) на рядовом каменном угле Кузнецкого бассейна марки ССР. Продолжительность топочного цикла $T_{\text{ц}} = 50 \div 70$ мин, масса порций угля — до 70 кг, теплонапряжение колосниковой решетки $M_{\text{QH}}/R = 0,3 \text{ МВт/м}^2$;

3) **топка 3** с круглой решеткой площадью $R = 0,61 \text{ м}^2$, работающая на антраците АС (класс “семечко”) без вентилятора, с дымососом, заброс топлива — по 20–26 кг через 20–25 мин, теплонапряжение решетки — 0,58 МВт/м².

Опыты с горением бурого угля в топке 1 проведены при массе порций угля 18, 20, 25 и 30 кг. На рис. 1 представлены результаты измерений в опыте с массой порций 30 кг (средний расход угля $m_{\text{ср}} = 3 \text{ кг/мин}$, теплонапряжение колосниковой решетки — 0,34 МВт/м²). Здесь использованы обобщающие значения RO_2 в нескольких циклах опыта, продолжавшегося более 4 ч. В начале цикла после заброса порции угля через открытую дверцу на слой температура газов в топке снизилась до 300 °С вследствие закрытия поверхности слоя свежим углем и возросших присосов воздуха. Последующий быстрый рост температуры в слое до 1200 °С и содержания RO_2 свидетельствовал о скоротечности подготовительных стадий, росте интенсивности процесса выгорания угля в начальный период сразу

после заброса угля. Такая ситуация характерна для “молодых” топлив, выделяющих большое количество летучих компонентов при невысоких температурах нагрева. В частности, бурые угли при нагреве выделяют до 45 % летучих, начиная с температуры 170 °С.

Максимальная скорость выгорания наступает уже на 2–3-й минутах топочного цикла за счет летучих; $(RO_2)_{max}$ достигает 15–17 % при среднем значении $(RO_2)_{cp} = 9,7\%$. Период наибольшей интенсивности выгорания и содержания RO_2 соответствует максимуму температур в слое и в надслойной зоне, характеризующих тепловыделение в слое и теплообмен в топке.

В период наибольшей интенсивности процесса горения возросшее потребление кислорода приводит к снижению избытка воздуха в уходящих газах до 2,5 %, а в топочных газах — до 0, что провоцирует химическую неполноту сгорания. Именно в этот период зафиксировано выделение продуктов неполного сгорания (CO , H_2) в опытах при сжигании каменного угля марки 2СС в этой же топке (рис. 2) [5].

Потери теплоты от химического и механического недожога угля составили соответственно 8 и 4 % от тепловыделения, что в пересчете на массу угля равно 2,7 и 1,4 %. С учетом этого недожога средняя интенсивность выгорания бурого угля — 2,88 кг/мин, или 1,7 кг/(м² · мин). Максимальная скорость выгорания $m_{max} = 5,5$ кг/мин с учетом дополнительного количества угля с неполным окислением углерода до окиси CO , что проявляется на 2–3-й минутах цикла.

После максимума спад выгорания угля обусловлен окончанием выделения летучих, уменьшением площади поверхности реагирования фракций, а также снижением скоростей воздуха в межкусковых каналах вследствие увеличения их размеров. В начале и в конце топочного цикла интенсивность сгорания наименьшая: $m_{min} = 1,2 \div 1,4$ кг/мин. Неравномерность сгорания угля, оцениваемая как отношение m_{max}/m_{cp} , составила 2, а отношение наибольшей к наименьшей интенсивности выгорания превысило 4.

Значительное изменение температур в слое от 300 до 1200 °С (см. рис. 1, а) свидетельствует не только о росте и спаде тепловыделения, отражающего изменение интенсивности выгорания угля. Снижение температур поверхности слоя и топочных газов в начале и во второй половине топочного цикла связаны главным образом с разбавлением газов

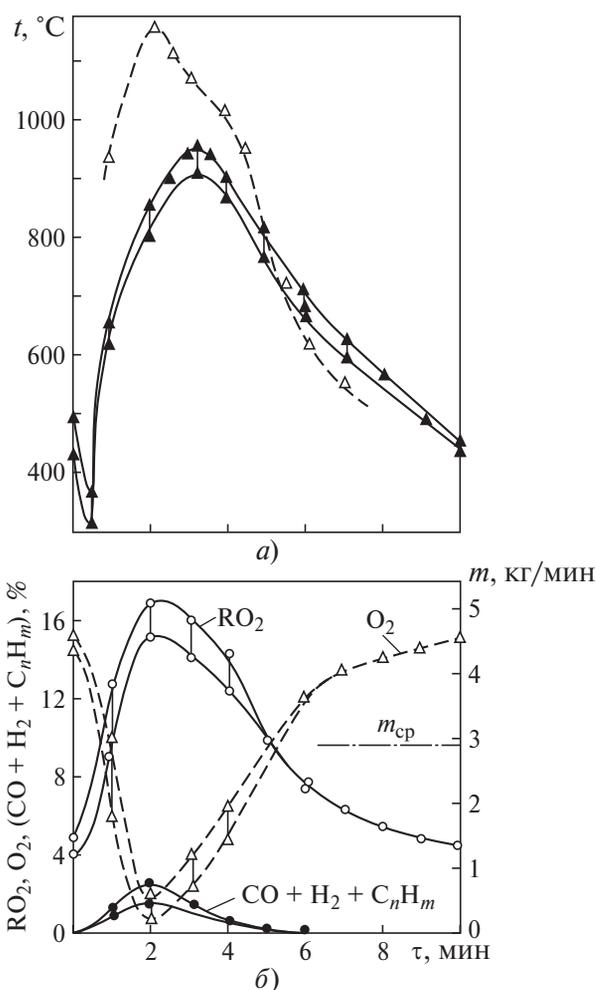


Рис. 1. Графики изменения температуры слоя и газов над слоем (а), химического состава топочных газов и локального количества m сгорающего бурого угля (б) в процессе топочного цикла:

$T_{ц} = 10$ мин; $m_{cp} = 2,88$ кг/мин; $(RO_2)_{cp} = 9,7\%$; \downarrow — момент загрузки порции угля; \triangle — температура поверхности слоя; \blacktriangle — температура газов над слоем

избыточным воздухом: в эти периоды локальный коэффициент избытка воздуха α возрастает до 4,2 при среднем значении 1,8–1,9.

Вся порция угля не успевает сгореть за время топочного цикла; оставшаяся часть топлива (около 10 %) переходит в следующий цикл. Механический недожог топлива в шлаке в рассматриваемых топках невелик вследствие длительного пребывания топлива в слое. Лишь топливо последних порций опыта не успевает полностью сгореть в слое. По мере накопления слоя шлака на решетке его аэродинамическое сопротивление увеличивалось и к концу 4-часового опыта составило 270 Па.

Рассчитать выгорание каменного угля в топке 2, работающей на естественной тяге дымовой трубы, оказалось сложнее. Здесь

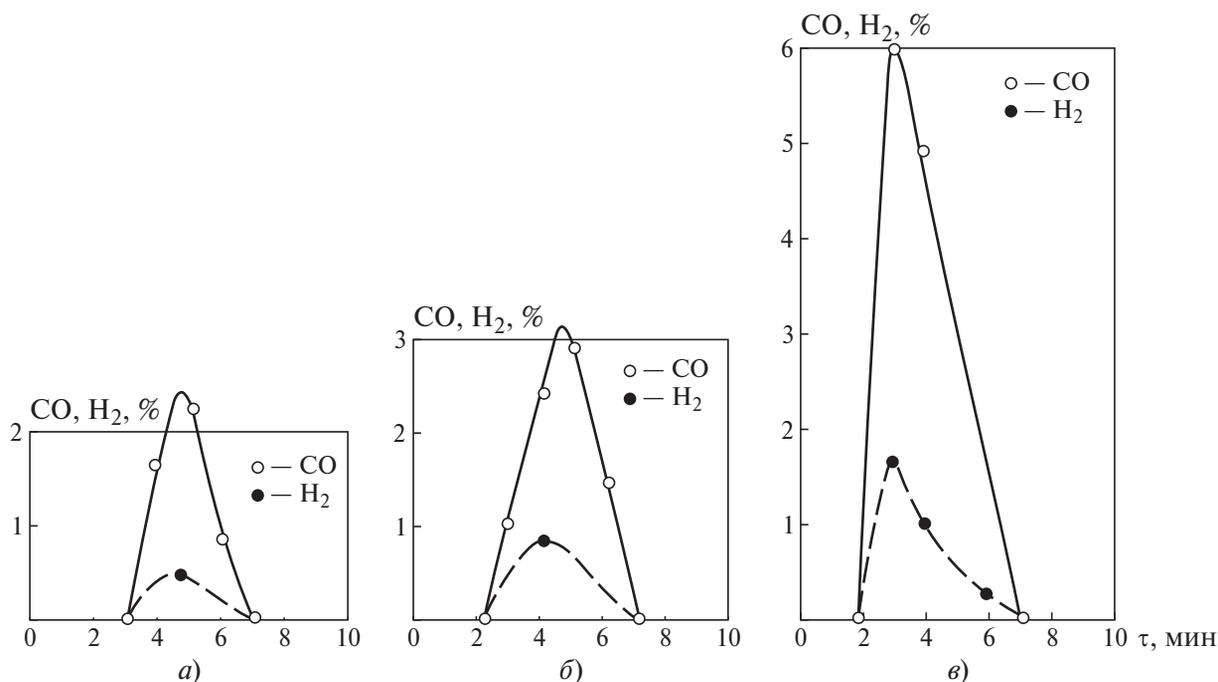


Рис. 2. Колебания содержания продуктов неполного сгорания в уходящих газах в течение топочных циклов при сжигании каменного угля 2СС:

a — $MQ_{\text{H}}/R = 300 \text{ кВт/м}^2$, $\alpha = 1,44$, $RO_2 = 12,2 \%$, $O_2 = 6,8 \%$; *б* — $MQ_{\text{H}}/R = 454 \text{ кВт/м}^2$, $\alpha = 1,43$, $RO_2 = 11,4 \%$, $O_2 = 7 \%$; *в* — $MQ_{\text{H}}/R = 715 \text{ кВт/м}^2$, $\alpha = 1,32$, $RO_2 = 12,4 \%$, $O_2 = 5,8 \%$

поступление воздуха в слой под воздействием разряжения в топке не постоянно, поскольку тяга трубы изменяется в соответствии с изменением температуры уходящих газов. Кроме того, со снижением высоты слоя угля и шлака на решетке в процессе каждого топочного цикла уменьшается аэродинамическое сопротивление поступлению воздуха. В связи с этим измерения расхода поступающего в слой воздуха в данном опыте выполнялись с помощью крыльчатого анемометра.

На рис. 3 приведены результаты измерений и расчетов при горении рядового каменного угля, содержащего как мелочь, так и крупные куски. При забросе больших порций угля (50 – 70 кг) температура слоя и топочных газов снижается до 200 °С, а затем растет, достигая максимальных значений — 1200 °С на 18 – 25-й минутах топочного цикла. Вследствие меньшего количества летучих, выделяющихся при более высоких температурах, и широкого диапазона размеров фракций интенсивность выгорания нарастает медленнее, чем в случае горения бурого угля.

Химический недожог в период наибольшей интенсивности горения также отмечен в этом опыте. Он проявился в возникновении газов неполного сгорания (СО, Н₂) в уходящих газах. При среднем расчетном расходе угля 0,98 кг/мин, или 0,7 кг/(м² · мин), хими-

ческий недожог угля оценивается в 8 %, с учетом чего построена кривая выгорания. Неравномерность выгорания каменного угля $m_{\text{max}}/m_{\text{ср}}$ была меньше, чем при горении бурого угля и в опыте составила 1,65. Возрастающий в течение топочного цикла расход воздуха не снижался к его концу вследствие уменьшения сопротивления слоя.

Отмеченные особенности процесса проявились и при горении антрацита марки АС (класс “семечко”) в слое на колосниковой решетке с долей живого сечения прозоров $\varphi = 9 \%$ при форсировке слоя $MQ_{\text{H}}/R = 0,58 \text{ МВт/м}^2$. Порция топлива 20 – 26 кг забрасывалась на слой через каждые 20 – 25 мин. При отсутствии дутьевого вентилятора воздух поступал в слой под воздействием разряжения, создаваемого дымососом. На рис. 4 представлены результаты измерений расхода воздуха, аэродинамического сопротивления и высоты слоя. При каждом забросе новой порции расчетная высота слоя шлака и несгоревшего топлива резко возрастала на 38 – 42 мм, а сопротивление увеличивалось с 200 до 400 Па. Затем по мере прогорания топлива сопротивление снижалось практически до исходного уровня. Такое сильное уменьшение сопротивления слоя, особенно в начале цикла, может свидетельствовать о перестройке его структуры при го-

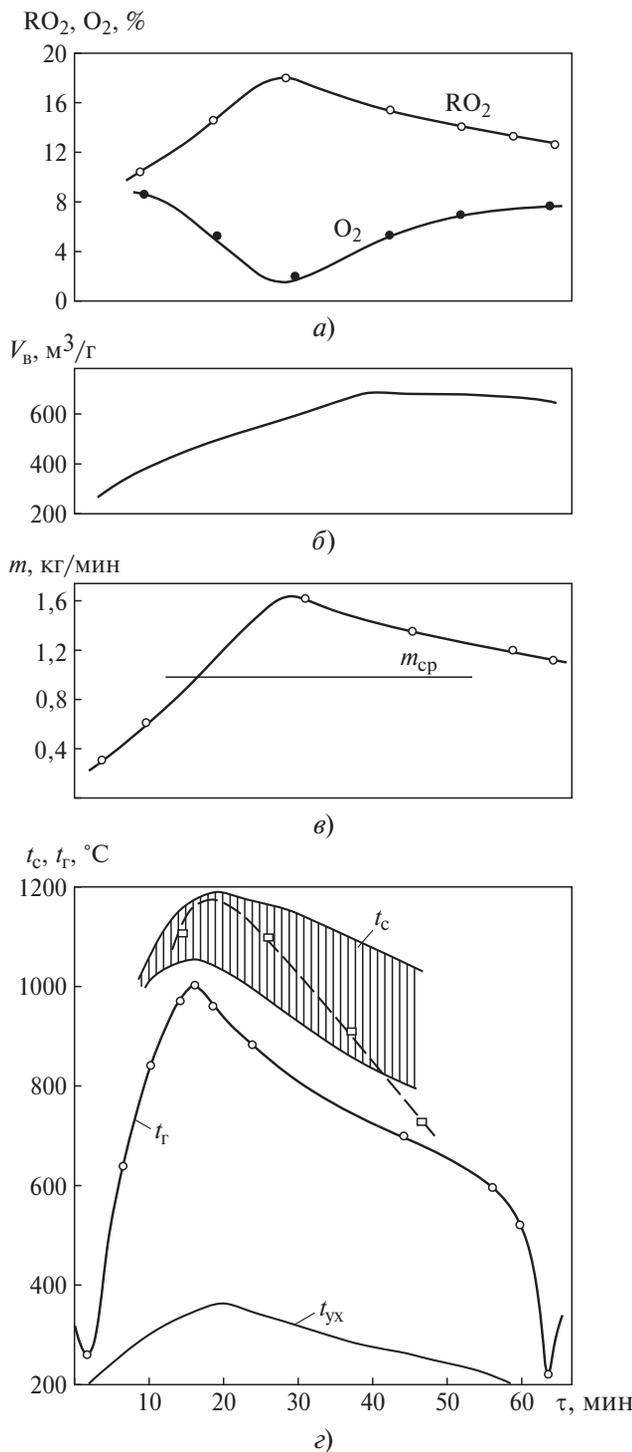


Рис. 3. Графики изменения химического состава уходящих газов (а), расхода воздуха (б), количества сгорающего каменного угля (в) и температуры слоя, топочных и уходящих газов (г) в процессе топочного цикла:

$m_{cp} = 0,98$ кг/мин; $T_{ц} = 64$ мин; $\varphi = 0,2$; ↓ — момент загрузки угля; заштрихованная область — температура слоя, измеренная пирометром; □ — температура слоя, измеренная термомпарой

рении, в частности, об увеличении размеров межкусковых воздушных каналов.

При средней интенсивности сгорания топлива $m_{cp} = 0,9$ кг/мин, или $1,48$ кг/($m^2 \cdot$ мин),

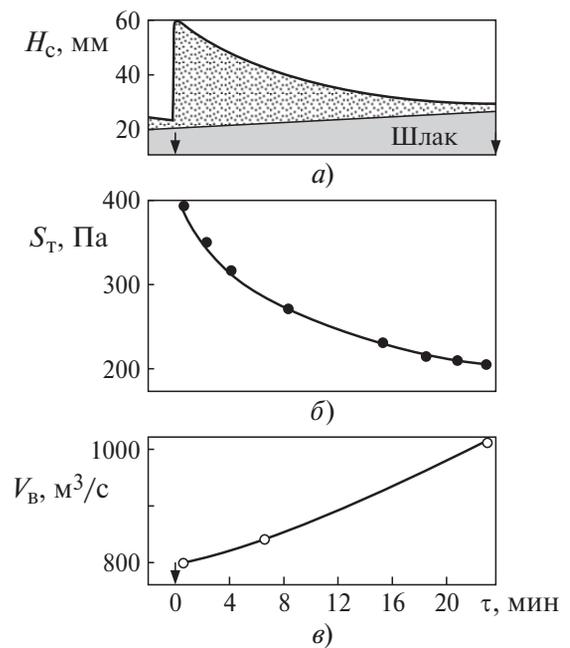


Рис. 4. Графики изменения высоты слоя топлива и шлака (а), аэродинамического сопротивления слоя (б) и расхода воздуха (в) при сгорании антрацита в слое:

$m_{cp} = 0,9$ кг/мин; $T_{ц} = 20 \div 22$ мин; $\varphi = 0,1$; ↓ — момент загрузки порции топлива

содержание RO_2 в уходящих газах изменялось с 8 до 14 % при среднем значении 10,9 %. Неравномерность выгорания антрацита $m_{max}/m_{cp} = 1,3$ оказалась меньше, а максимальная интенсивность выгорания наступала позже, чем при горении бурых и каменных углей. Это связано с небольшой долей разлагающихся веществ и выделяющихся в виде летучих при более высоком нагреве и с меньшей влажностью антрацита. Данным обстоятельством можно объяснить и высокий уровень наибольших температур в слое (до $1250^{\circ}C$) даже при большем избытке воздуха в топочных газах $\alpha_{cp} = 2,3$. Более высокие значения температуры (до $1400^{\circ}C$) развивались в слое при меньших избытках воздуха.

Распределение температур по высоте слоя в топке 3 показано на рис. 5. Снижение температур на поверхности слоя связано с интенсивным радиационным теплообменом поверхности слоя с топочными экранами, температура которых не превышала $140^{\circ}C$. Тепловые потоки, воспринимаемые поверхностями топочных экранов, достигают 150 кВт/ m^2 . Накопление шлака на решетке отодвигает зону горения вверх от колосниковой решетки, что снижает температуру колосников.

Таким образом, значительная неравномерность скорости выгорания твердого топлива,

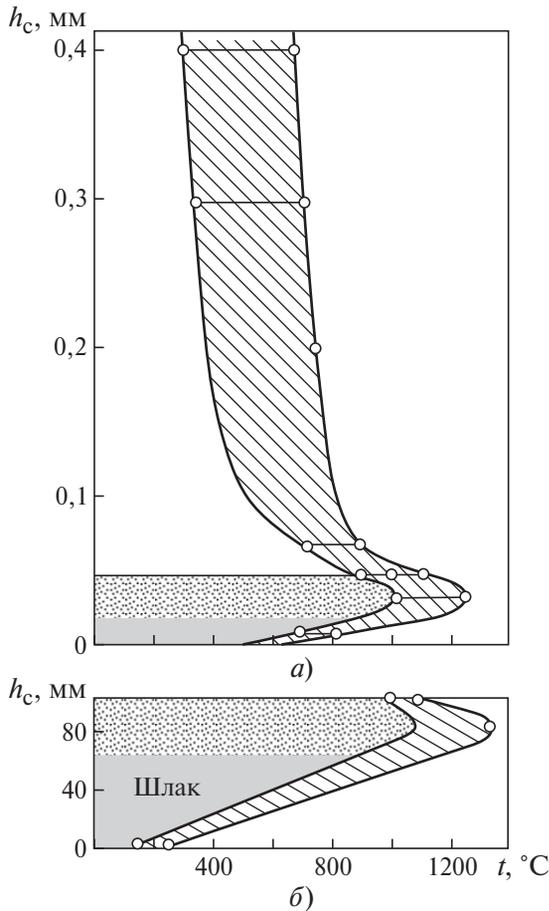


Рис. 5. Графики распределения температуры по высоте слоя и газов в полностью экранированной топке при горении антрацита АС при $\alpha_{\text{ср}} = 2,3$

органически присущая процессу, возрастает для топлив с большей долей летучих и с ростом форсировки слоя. Средняя интенсивность сгорания твердых топлив в слое определяется скоростью воздуха, пронизывающего

слой, как следует из сопоставления результатов многих опытов с разными слоевыми топками. С ростом форсировки слоя при повышении скорости воздуха увеличивается унос несгоревших тонких фракций угля. Такая опасность особенно возрастает при сжигании рядовых топлив, имеющих штыбовые фракции размером 0 – 2 мм.

Значительное увеличение интенсивности сгорания угля в слое достигается в механических топках с шурующей планкой за счет усиления теплообмена при частых шурунках слоя (периодических возвратно-поступательных движениях шурующей планки) и больших скоростей воздуха в слое вследствие меньшей доли проходного сечения прозоров (здесь ϕ уменьшена до 0,04 – 0,1). В таких топках средняя интенсивность сгорания каменных углей достигала $9,5 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{мин})$, что соответствует теплonaпряжению зеркала горения $1,2 \text{ МВт}/\text{м}^2$.

Список литературы

1. Кнорре Г. Ф. Топочные процессы. — М.-Л.: ГЭИ, 1949.
2. Каменецкий Б. Я. Стадии горения полифракционного топлива в слое. — Теплоэнергетика, 2009, № 6.
3. Каменецкий Б. Я. Нестационарный теплообмен в слоевых топках. — ИФЖ, 1987, т. 53, № 3.
4. Каменецкий Б. Я. Кинетика сгорания угля в слое при циклическом теплообмене. — Теплоэнергетика, 1990, № 12.
5. Кулаков В. В., Троицкая Ф. Б. Исследование сжигания каменных углей в котлах. — Сб. тр. НИИ сантехники, 1976, № 45.

bikam34@mail.ru