

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАЩЕННОГО ПРОЦЕССА СЛОЕВОЙ ГАЗИФИКАЦИИ УГЛЯ

И. О. Михалёв, С. Р. Исламов

Энерготехнологическая компания «Сибтермо», 660028 Красноярск, termo@24kr.ru

Выполнено экспериментальное исследование обращенного процесса слоевой газификации бурого угля на воздушном дутье. Дано определение скорости обращенного процесса газификации. Получены зависимости основных характеристик работы газификатора (скорости процесса, скорости тепловой волны, производительности по горючему газу и среднетемпературному коксу) от фракционного состава исходного угля и расхода дутьевого воздуха. Выполнен анализ взаимосвязи технологических характеристик процесса и его управляющих параметров. Определены целевые режимы использования данного технологического процесса, сформулированы способы его интенсификации.

Ключевые слова: бурый уголь, газификация, карбонизация, обращенное воздушное дутье, интенсификация.

ВВЕДЕНИЕ

Обращенный процесс слоевой газификации угля (спутная подача топлива и окислителя) [1] имеет несколько принципиально важных отличий от широко известного классического способа со встречной подачей топлива и окислителя. Во-первых, получаемый газ не содержит продуктов пиролиза, во-вторых, при определенных параметрах режима можно производить частичную газификацию угля, т. е. его карбонизацию. В настоящее время эти особенности представляют значительный практический интерес применительно к переработке дешевых марок углей с целью получения как генераторного газа, не забалластированного смолами, так и заменителя определенных марок классического кокса. Однако производительность обращенного процесса сравнительно низка. По этой причине в прошлом веке в период наиболее активного использования процессов газификации угля данная технология выбыла из конкурентной борьбы, что, в свою очередь, обусловило резкое снижение интереса исследователей к этой теме и, как следствие, отсутствие достаточно подробных экспериментальных данных.

Так, в известных работах [2, 3] частичная газификация угля практически не рассматривалась. Автор [2] при аналогичной представленной в настоящей статье схеме организации процесса взаимодействия топлива с окислителем исследовал технологию сжигания твердого топлива. В работах [3–5], где подробно изу-

чалась газификация угля, обращенный процесс рассматривался только на качественном уровне; основное внимание было уделено прямому процессу газификации. В этой связи необходимо отметить практически полное отсутствие количественных данных о процессе газификации с обращенным дутьем для различных видов угля.

В настоящее время отношение к обращенному процессу газификации угля, также известному как процесс «Термококс-С», радикально изменилось [6] и это вызывает необходимость детального исследования его закономерностей как с целью непосредственного применения в промышленности, так и с целью поиска путей интенсификации технологического процесса.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Газификатор представляет собой вертикальный реактор шахтного типа периодического или непрерывного действия. В настоящей работе использовался реактор периодического действия диаметром 300 мм со стационарным слоем дробленого угля. Зажигание слоя осуществлялось сверху. Воздух подавался снизу. При определенных условиях через некоторое время после зажигания в верхней части слоя формируется тепловая волна, которая затем перемещается навстречу дутью примерно с постоянной скоростью. Для измерения температуры слоя угля внутри засыпки уста-

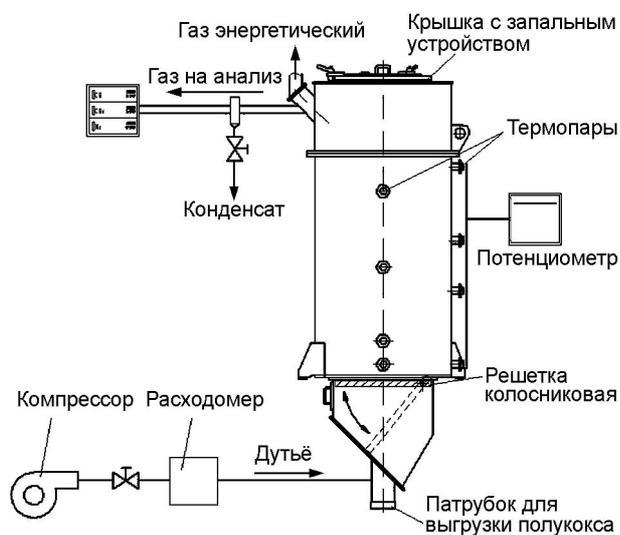


Рис. 1. Схема экспериментального стенда

навливались с шагом 180 мм семь защищенных хромель-алюмелевых термопар с диаметром термочувствительного элемента 5.3 мм. Непрерывный анализ продуктового газа выполнялся с помощью газоанализатора «Гамма-100». Схема экспериментального стенда представлена на рис. 1.

Исследовали бурый уголь разреза «Бородинский» (марка 2Б), как наиболее перспективное сырье для обращенного процесса газификации. Изучалось влияние расхода дутьевого воздуха и фракционного состава на производительность реактора и свойства получаемых продуктов газификации. Для оценки влияния фракционного состава угля использовались узкие фракции 1 ÷ 3, 3 ÷ 5 и 5 ÷ 8 мм (в дальнейшем просто «фракции»), а также широкая фракция 3 ÷ 10 мм с равномерным распределением размеров частиц (в дальнейшем для краткости называем ее «полифракция»). Размеры частиц были выбраны из соображений минимизации их термического сопротивления с целью обеспечения максимальной скорости переработки угля. Исследованный диапазон расходов воздуха охватывал область режимов от частичной карбонизации до полной газификации угля.

В зависимости от фракционного состава сырья и расходов дутьевого воздуха были определены следующие характеристики процесса газификации: скорость перемещения фронта тепловой волны по слою угля; скорость потери массы угля (рассчитанная по потере массы

твердой фазы и по выходу продуктового газа); удельный выход, химический состав и calorийность получаемого газа; выход твердого продукта (в процентах от массы исходного угля) и его calorийность; максимальные температуры в тепловой волне.

Особое внимание в настоящем исследовании уделено определению скорости процесса газификации, представляющей собой количество массы, переходящей из твердой фазы в газ в единицу времени, отнесенное к единице площади сечения реактора. Следует отметить, что при использовании реактора периодического действия этот показатель изменяется во времени, постепенно приближаясь к стационарному значению. Скорость процесса газификации рассчитывалась двумя способами: по потере массы твердой фазы для зоны реактора с установившимся режимом и по выходу газообразного продукта.

В первом варианте исходная масса угля в расчетной зоне была известна из начальных условий эксперимента, а масса твердого остатка определялась как произведение массы исходного угля в данной зоне на коэффициент интегрального выхода твердого остатка (доля массы исходного угля). Скорость газификации, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, рассчитывали как разность между этими массами, отнесенную к времени прохождения фронтом тепловой волны рассматриваемого участка и к площади сечения реактора.

Во втором варианте на основании данных о химическом составе сухого продуктового газа и массового баланса азота в подаваемом дутье и сухом газе определялась полная масса газа, произведенного в реакторе за время прохождения фронтом тепловой волны участка с установившимся режимом. Разность между этой массой продуктового газа и соответствующей массой поданного дутья, отнесенная к времени прохождения рассматриваемого промежутка фронтом тепловой волны и к площади сечения газификатора, представляет собой искомую скорость газификации угля.

Ошибки измерения регистрируемых в опытах величин приведены в табл. 1, характеристики топлива — в табл. 2.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Изменение скорости газификации угля в исследованном диапазоне удельных расходов воздуха показано на рис. 2.

Таблица 1

Погрешности измерений в эксперименте

Параметр	Зависимые показатели	Погрешность измерения
Расход воздуха, $\text{м}^3/\text{с}$	Расход воздуха, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ Выход газа, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ Скорость процесса, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$	3 % от измеряемой величины
Объемное содержание H_2 , CO , CO_2 в сухом газе, %	Калорийность газа, $\text{кДж}/\text{м}^3$ Выход газа, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ Скорость процесса, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ Состав сырого газа, %	5 % от измеряемой величины
Масса твердой фазы, кг	Выход твердого продукта, % Скорость процесса, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$	0.1 кг (до 5 % от измеряемой величины)
Время, с	Выход газа, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ Скорость процесса, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ Объемный состав сырого газа, % Калорийность газа, $\text{кДж}/\text{м}^3$ Скорость тепловой волны, $\text{м}/\text{с}$	0.5 с
Температура, $^{\circ}\text{C}$	Максимальная температура процесса, $^{\circ}\text{C}$	15 $^{\circ}\text{C}$ (при измерении T_{\max})
Калорийность твердого продукта газификации, $\text{кДж}/\text{кг}$	—	170 ÷ 420 $\text{кДж}/\text{кг}$ (в зависимости от влажности сырья)

Таблица 2

Технический и элементный состав угля марки 2Б разреза «Бородинский»

W_t^r , %	A^d , %	V^{daf} , %	C^{daf} , %	O^{daf} , %	H^{daf} , %	N^{daf} , %	S_t^d , %	Q_i^r , $\text{МДж}/\text{кг}$
30.0	4.9	47.5	73.8	20.43	4.8	0.78	0.18	17.7

Примечание. W_t^r — содержание влаги в рабочей массе угля, A^d — содержание золы в сухой массе угля, V^{daf} — содержание летучих в сухой беззольной массе угля, C^{daf} , O^{daf} , H^{daf} , N^{daf} — содержание соответственно углерода, кислорода, водорода, азота в сухой беззольной массе угля, S_t^d — содержание серы в сухой массе угля, Q_i^r — низшая теплота сгорания угля.

На рис. 3–6 представлены основные характеристики исследованного процесса в зависимости от фракционного состава исходного угля и расхода дутьевого воздуха. Для сравнения приведены также соответствующие характеристики промышленного процесса карбонизации, реализованного на заводе «Карбоника-Ф» (г. Красноярск). В качестве сырья на заводе используется бурый уголь марки 2Б разреза «Бородинский» класса 5 ÷ 15 мм.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как следует из рис. 2, скорость процесса газификации угля, т. е. скорость превращения твердой фазы в газовые продукты, линейно возрастает с увеличением расхода дутья. Расчеты по твердой фазе и по газу совпадают с точностью до 1 %. Скорость процесса слабо за-

висит от фракционного состава сырья: видно, что значения этого показателя для исследованных фракций во всем диапазоне практически укладываются в коридор погрешности.

Одновременно со скоростью потери массы увеличивается и скорость движения фронта тепловой волны. Важно отметить, что скорость волны возрастает с увеличением расхода дутьевого воздуха, а при одинаковом расходе дутья — с уменьшением размера фракции. Это не противоречит слабой зависимости суммарной скорости процесса от фракционного состава сырья, поскольку скорость тепловой волны, по сути, определяет пропорцию между массами газового и твердого продуктов газификации. Чем выше скорость тепловой волны при одном и том же расходе воздуха (чем меньше фракция сырья), тем больше выход твердого

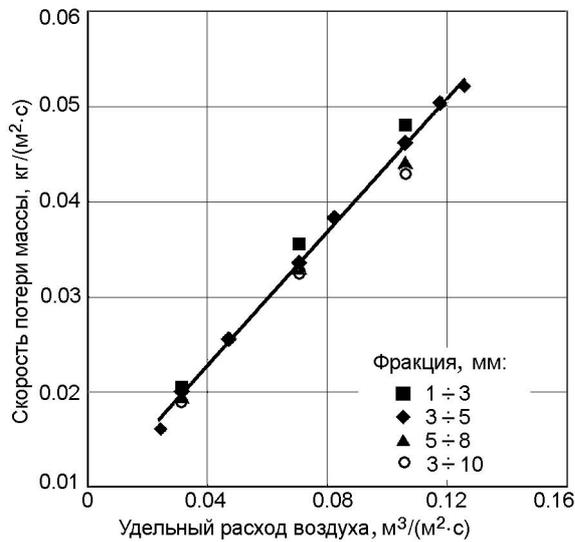


Рис. 2. Зависимость скорости процесса газификации от расхода дутья

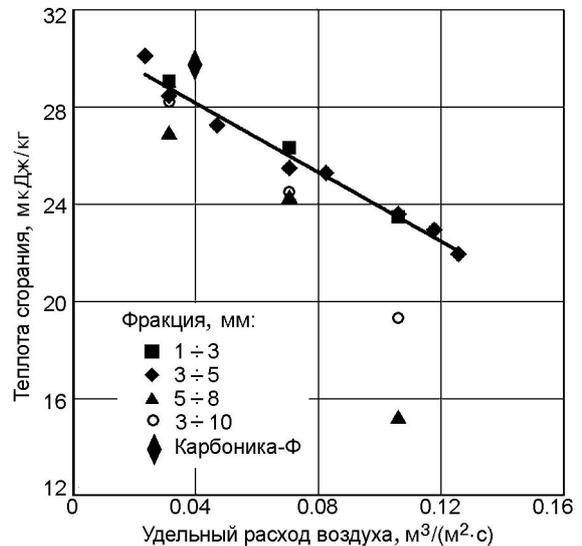


Рис. 4. Зависимость теплоты сгорания твердого остатка газификации от расхода дутья

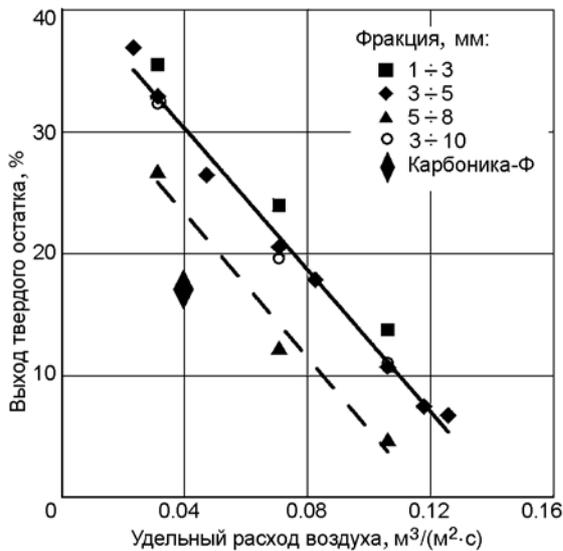


Рис. 3. Зависимость выхода твердого остатка газификации от расхода дутья

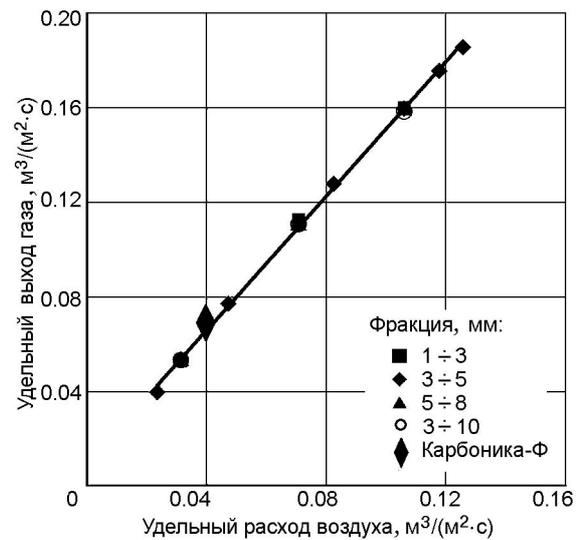


Рис. 5. Зависимость удельного выхода сырого газа от расхода дутья

продукта. Полифракция в области низких расходов дутья по показателю скорости тепловой волны близка к фракции 5 ÷ 8 мм, имеющей такой же средний размер частиц (6.5 мм). Однако с увеличением расхода дутья скорость тепловой волны для полифракции становится выше, чем для фракции 5 ÷ 8 мм, и все сильнее отклоняется в сторону показателей для более мелких фракций.

Данные по скорости тепловой волны для широкой полифракции, используемой на заводе

«Карбоника-Ф», свидетельствуют о существовании нижнего предела скорости тепловой волны вблизи значений, установленных для фракции 5 ÷ 8 мм, по крайней мере в зоне карбонизации: существенное расширение и укрупнение фракции не приводит к дальнейшему уменьшению скорости тепловой волны в зависимости от этого параметра.

Удельный выход продуктового газа линейно возрастает с увеличением расхода дутьевого воздуха и не зависит от фракционного со-

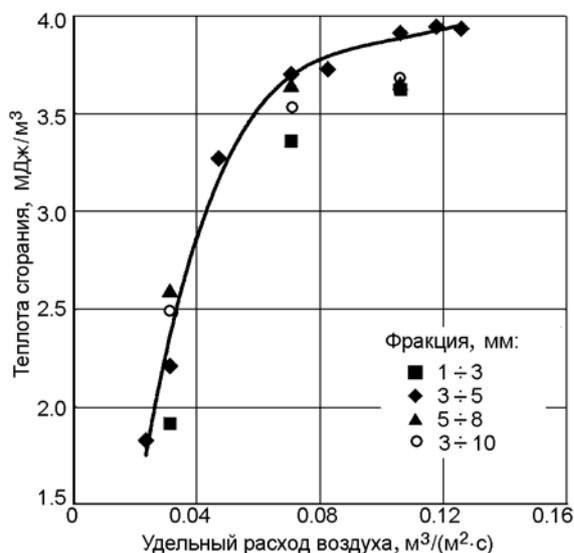


Рис. 6. Зависимость теплоты сгорания сырого продуктового газа от расхода дутья

става сырья. Калорийность газа в случае мелких фракций и полифракции имеет максимум в области больших расходов дутьевого воздуха, чем в случае крупной фракции (см. рис. 6). При этом абсолютное значение максимума в случае фракции 3 ÷ 5 мм выше аналогичного значения в случае фракции 5 ÷ 8 мм. Это означает, что использование мелкой фракции позволяет получить более калорийный газ при большем расходе воздуха, чем в случае крупной фракции, с большей адиабатической температурой сгорания газа (благодаря повышенной температуре процесса). Следовательно, использование мелкой фракции позволяет получить большую производительность реактора по газу (см. рис. 5) и тем самым обеспечить интенсификацию процесса полной газификации.

Выход твердого продукта (относительно массы исходного угля) тем выше, чем меньше размер фракции (см. рис. 3). По выходу твердого продукта газификации во всем диапазоне расходов полифракция оказывается ближе к фракциям со средним размером частиц меньше 6.5 мм (1 ÷ 3 и 3 ÷ 5 мм). Данные по этому показателю для широкой полифракции, используемой на заводе «Карбоника-Ф», дают основание предполагать дальнейшее снижение выхода твердого продукта газификации с увеличением среднего размера частиц исходного топлива.

Повышенный выход твердого продукта в случае мелких фракций по сравнению с круп-

ными при одинаковом расходе дутья обусловлен повышением плотности теплового потока у крупных фракций при том же суммарном тепловыделении. Удельная поверхность твердой фазы в случае фракции 1 ÷ 3 мм приблизительно в три раза больше, чем у фракции 5 ÷ 8 мм. В то же время, как показывают наши оценки, количество тепла, которое выделяется при сгорании летучих, одинаково для мелкой и крупной фракций, но приходится на разную площадь — в случае крупной фракции площадь меньше. Это способствует как повышению максимальной температуры процесса (усилению разогрева компонентов системы), так и более интенсивному протеканию эндотермических гетерогенных реакций за фронтом тепловой волны (т. е. в зоне восстановления). Благодаря интенсификации гетерогенного реагирования в случае крупной фракции увеличивается содержание в горючем газе продуктов реакций восстановления (СО и Н₂) за счет продуктов полного сгорания топлива (СО₂ и Н₂О). Это приводит к соответствующему повышению калорийности газа.

Как видно из рис. 3, при низких расходах дутьевого воздуха 0.022 ÷ 0.047 м³/(м²·с) реализуется режим карбонизации, т. е. неполной газификации исходного угля: выход твердого остатка в этом случае максимален. Теплота сгорания твердого продукта в этом диапазоне расходов также максимальна (см. рис. 4). Очевидно, что указанный диапазон может быть рекомендован для целевого получения полукокса (среднетемпературного кокса). Горючий газ в этом случае является побочным продуктом.

Отметим, что в режимах карбонизации калорийность твердого продукта слабо зависит от фракционного состава сырья. С учетом того, что скорость тепловой волны выше при использовании мелких фракций, можно сделать вывод, что они предпочтительнее при производстве полукокса, который далее предполагается брикетировать (в этом случае фракционный состав продукта не играет большой роли), поскольку производительность реактора по твердому продукту в таком случае максимальна.

В соответствии с данными, представленными на рис. 5, при больших значениях расхода воздуха 0.100 ÷ 0.125 м³/(м²·с) реализуются режимы, близкие к полной газификации исходного угля: в этих режимах достигаются максимальный выход горючего газа и максимум его калорийности (см. рис. 6) за счет наи-

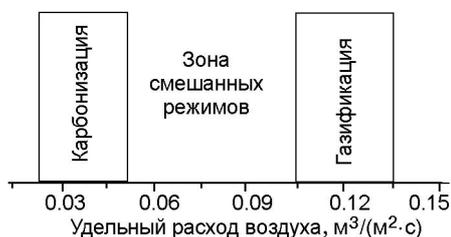


Рис. 7. Диаграмма режимов работы слоевого газификатора угля с обращенным дутьем

больших концентраций горючих компонентов. Следовательно, в этом диапазоне целевым продуктом можно считать только генераторный газ, поскольку твердый остаток газификации представляет собой золу с небольшим (в абсолютном измерении) количеством остаточного углерода.

Таким образом, в исследованном диапазоне удельных расходов дутья выявлены две зоны целевых режимов осуществления обращенного процесса газификации: зона карбонизации угля, т. е. целевого производства полукокса, и газификации угля, т. е. целевого производства генераторного газа (рис. 7). Между ними находится промежуточная область расходов дутья, при которых твердый остаток и горючий газ производятся в соизмеримых количествах. Однако и физико-химические характеристики, и удельные выходы обоих продуктов сравнительно невысоки.

Очевидно, что при дальнейшем увеличении расхода дутьевого воздуха за пределы зоны газификации угля (свыше $\approx 0.125 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$) процесс газификации постепенно трансформируется в процесс горения угля. Это подтверждается тенденцией изменения химического состава газа: на верхней границе исследованного диапазона расходов дутья начинает расти содержание CO_2 в газе при соответствующем понижении содержания CO . Эта область

режимов не представляет интереса с точки зрения практического использования обращенного процесса слоевой газификации угля.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследовано влияние расхода дутьевого воздуха и фракционного состава исходного угля на процесс слоевой газификации бурого угля с обращенным дутьем. Определены диапазоны расходов дутьевого воздуха для целевых режимов работы слоевого газификатора. Изучены особенности технологических процессов в каждом из диапазонов и предложены способы их интенсификации. Полученные результаты могут быть использованы для повышения эффективности работы газификаторов бурого угля с обращенным дутьем на действующих заводах в России и Монголии, а также при проектировании новых предприятий на основе технологии «Термококс-С» для бурых углей.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Исламов С. Р., Степанов С. Г.** Способ получения металлургического среднетемпературного кокса // Пат. 2288937 РФ. № 2005132548/04; Заявл. 24.10.2005; Опубл. 10.12.2006; Бюл. № 34.
2. **Кнорре Г. Ф.** Топочные процессы. — 2-е изд. — Л.: Госэнергоиздат, 1959.
3. **Лавров Н. В.** Физико-химические основы горения и газификации топлива. — М.: Металлургиздат, 1957.
4. **Шиллинг Г.-Д., Бонн Б., Краус У.** Газификация угля. — М.: Недра, 1986.
5. **Химические вещества из угля** / Под ред. Ю. Фальбе. — М.: Химия, 1980.
6. **Исламов С. Р.** Современные процессы энерготехнологической переработки угля. Актуальные проблемы энергетики: материалы III Международ. науч.-практич. конф. — Екатеринбург: Изд-во «ИРА УТК», 2007. — С. 88–90.

Поступила в редакцию 11/XII 2008 г.,
в окончательном варианте — 17/III 2009 г.