

ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

З. Ф. ЧУХАНОВ, член-корреспондент Академии Наук СССР

ЗАМЕЧАНИЯ К ВОПРОСУ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ГАЗИФИЦИРУЕМОГО СЛОЯ УГЛЯ

Рациональная организация температурного режима топки или газогенератора, работающих на данном твердом кусковом топливе, определяет в значительной мере техническую осуществимость, а в дальнейшем и стационарность работы соответствующего промышленного аппарата.

В настоящее время вопрос организации теплового режима топки и газогенератора основан на сугубо эмпирической базе. Однако совершенно очевидно, что использование богатого опыта эксплуатации газогенераторов и топок* позволяет в некоторой мере качественно предвидеть и предвычислить тепловой режим работы аналогичных аппаратов, работающих только в пределах испытанного изменения условий протекания этого процесса. В случае некоторого изменения параметров процесса за обычные пределы работы существующей аппаратуры (высокоскоростное сжигание и газификация) получаемый экспериментальный материал совершенно несовместим с обычным представлением, выработанным на основе опыта существующих промышленных аппаратов.

Тепловой режим работы газогенератора диктует зачастую как технологическую схему газификации данного сорта топлива, так и максимально достижимый коэффициент полезного действия данной установки.

Как известно из опыта работы газогенераторов и топок, температура горящего слоя всегда значительно ниже теоретической температуры процесса горения. Объяснение этому факту обычно дают самое разнообразное, начиная с указания на резкое отличие температур углерода и газа⁽¹⁾ (высокая температура газа и низкая температура углерода) и кончая ссылками на решающее значение потерь тепла в окружающее пространство через стенки аппарата.

Если для индивидуальной горячей частицы углерода мы имеем ряд весьма интересных попыток теоретического определения температурных условий горения этой частицы в различных условиях^(2,3), то для слоя обстоятельных и серьезно обоснованных попыток расчета температурного поля или даже максимальной фактической температуры газифицируемого или горящего слоя топлива (углерода) автору не приходилось встречать.

В данной работе сделана попытка найти путь решения этой сложной задачи и указать те параметры, которые могут сближать фактическую и теоретическую температуры горящего углеродного (угольного) слоя.

* В принципе процессы горения и газификации твердых топлив в слое идентичны.

Рассмотрим горение слоя углерода в цилиндрической шахте. Для простоты анализа примем потери тепла в окружающее пространство равными нулю.

Дутье подается в слой углерода снизу вверх через решетку, от которой оно отнимает все тепло, воспринимаемое решеткой от горящего слоя. Углерод подается в шахту сверху.

Линейная «скорость» выгорания слоя углерода всегда значительно меньше, чем линейная скорость движения газового потока, что при противотоке и небольшом размере горящих частиц углерода всегда приводит (опыт подтверждает указанное обстоятельство) к равенству температур газа и углерода в конце кислородной зоны, т. е. к нагреву поступающего в кислородную зону углерода до температуры выходящего из кислородной зоны газа.

Из уравнения теплового баланса кислородной зоны в указанных условиях получаем значение фактической температуры поверхности углерода в конце кислородной зоны, а также теоретической температуры процесса в этих условиях:

$$T_{\text{п}} = \frac{A - B}{C_{\text{г}} - C_{\text{к}}}, \quad T_{\text{теорет}} = \frac{A}{C_{\text{г}} - C_{\text{к}}},$$

где A —тепловой эффект процесса, соответствующий газообразованию в конце кислородной зоны*; B —«теплоотвод по слою углерода»—тепло, переданное слою углерода из кислородной зоны в зону восстановления путем излучения и теплопроводности; $T_{\text{п}}$ —температура углерода и газа в точке, ограничивающей балансируемую зону; $T_{\text{теорет}}$ —теоретическая температура процесса в той же точке; $C_{\text{г}}$ и $C_{\text{к}}$ —теплоемкости газа и углерода (кокса) для эквивалентных количеств газа и углерода соответственно газообразованию.

Отношение фактической температуры к теоретической температуре для указанной точки слоя определяется следующим соотношением:

$$d = \frac{T_{\text{п}}}{T_{\text{теорет}}} = 1 - \frac{B}{A}.$$

Из этого соотношения следует, что фактическая температура поверхности углерода и газа в конце кислородной зоны тем ближе к теоретической температуре процесса, чем меньше «теплоотвод по слою углерода».

Как видно из схемы фиг. 1 (а), наличие при малой скорости дутья (обычной для существующих промышленных аппаратов) значительного «теплоотвода» дает ядро максимальных температур в слое углерода, лежащее где-то у середины кислородной зоны. Максимальная температура в этих условиях является функцией газообразования $T_{\text{п}}$ и B —длины кислородной зоны и характера «теплоотвода».

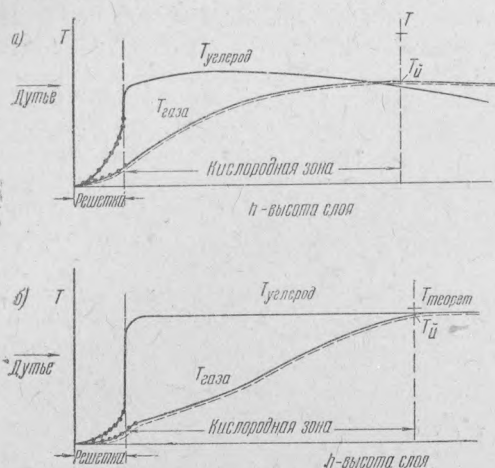
Как правило, температура слоя углерода в кислородной зоне не превышает теоретической температуры процесса и одновременно температура углеродной поверхности** почти всегда выше соответствующей температуры газа. В восстановительной зоне***, наоборот, температура газа в большинстве случаев выше температуры углерода.

* Приведенные рассуждения справедливы и при неравенстве температур углерода и газа в конце кислородной зоны, так как точка баланса слоя может не совпадать с концом кислородной зоны, она определяется равенством $T_{\text{п}}$ и $T_{\text{г}}$.

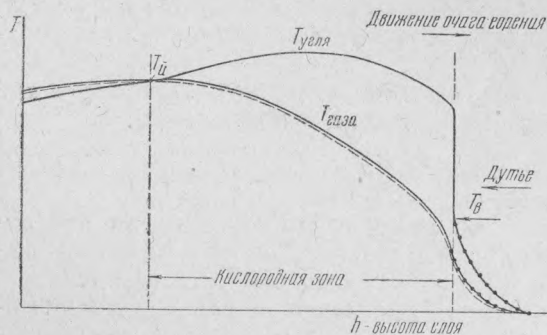
** Некоторое искажение температурного поля происходит за счет догорания CO , H_2 и летучих в объеме. Этот фактор выравнивает температуры углерода и газа в кислородной зоне.

*** Разделение на кислородную зону и зону восстановления несколько условно вследствие протекания восстановительных реакций и в кислородной зоне. Условной кислородной зоной мы называем зону по длине слоя, где присутствует в объеме кислород, концентрация которого выше некоторого определенного практически малого условного значения (обычно выше 1%).

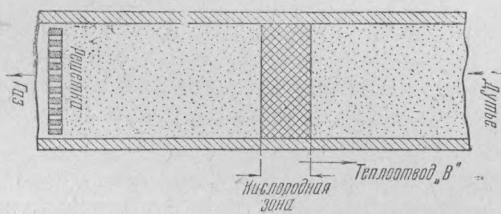
Чтобы установить, как ведет себя отношение $\frac{B}{A}$ при увеличении интенсивности дутья, рассмотрим влияние характера газообразования на теоретическую температуру процесса, а также рассмотрим процесс газификации и горения углерода и рабочих топлив при ограниченном воспламенении слоя топлива.



Фиг. 1. Схема распределения температур по высоте слоя газифицируемого угля (неограниченное воспламенение). а) — малые скорости дутья, б) — высокие скорости дутья.



Фиг. 2. Схема распределения температур вдоль газифицируемого слоя (ограниченное воспламенение).



Фиг. 3. Схема горящего слоя с очагом горения, расположенным в середине слоя.

не изменится и при применении рабочего топлива вместо углерода, если при

теоретическую температуру процесса, а также рассмотрим процесс газификации и горения углерода и рабочих топлив при ограниченном воспламенении слоя топлива.

Газообразование в слое в любой точке кислородной зоны при сухом дутье определяется из соотношения скоростей реакций: взаимодействия углерода с кислородом, восстановления углекислоты и горения окиси углерода (4).

Соотношение между скоростями этих реакций может быть в зависимости от условий самым разнообразным, так что в конце кислородной зоны мы можем иметь различное соотношение между окислами углерода (5).

При увеличении линейной скорости дутья в силу снижения роли реакции горения окиси углерода теоретическая температура процесса снижается. Однако из сказанного вовсе не следует, что падает и фактическая температура поверхности углерода, так как величина B в уравнении теплового баланса может при определенных условиях иметь существенное значение (6).

Выше (фиг. 1) мы рассматривали горение углерода в условиях неограниченного воспламенения, когда направления движения дутья и очага горения совпадают, а поступающий в кислородную зону углерод подогревается горячими газами*. Совершенно очевидно, однако, что картина процесса, изображенная на фиг. 1, в принципе

* Процесс горения углерода рассматривается в данной работе для так называемой диффузионной области, когда суммарная скорость процесса (по кислороду) определяется практически скоростью диффузии кислорода к поверхности углерода.

этом в кислородную зону будет поступать подготовленный и нагретый кокс.

Резкое изменение характера протекающего процесса происходит при ограниченном воспламенении, когда направление очага противоположно направлению дутья и воспламенение углерода и его подготовка происходят за счет «теплоотвода» по слою навстречу дутьевому потоку.

В данном случае «теплоотвод» является источником подогрева и воспламенения углерода (фиг. 2).

Рассмотрим развитие процесса горения слоя твердого топлива для случая, изображенного на фиг. 3. В середине вертикального слоя топлива, помещенного в цилиндрическую шахту, создается очаг, причем дутье подается в слой сверху вниз.

При равномерном движении слоя топлива и дутья верхняя граница горящего слоя бывает очень резко очерчена—это начало кислородной зоны и границы воспламенения топлива.

При подаче дутья в горящий слой с малой скоростью граница воспламенения начинает передвигаться вверх навстречу дутью; в этом случае линейная скорость передвижения изотермы воспламенения вследствие сильного «теплоотвода» навстречу дутью больше «линейной скорости» выгорания топлива.

Как показывает опыт, увеличение скорости дутья уменьшает скорость передвижения очага вверх, так что при некоторой вполне определенной для данного случая скорости верхняя кромка кислородной зоны остается неподвижной. Дальнейшее увеличение скорости дутья приводит к передвижению очага вниз, причем с тем большей скоростью, чем больше скорость дутья.

Величина скорости дутья, при которой очаг остается неподвижным, может быть определена для данных условий как максимально допустимая для стационарного горения при условии полностью ограниченного воспламенения топлива.

Указанная максимальная скорость определяется тем, что при ней линейная скорость выгорания слоя топлива равна линейной скорости передвижения изотермы воспламенения (данного топлива).

Скорость выгорания топлива (например, кокса или подмосковного угля) может быть при значительной скорости дутья с достаточной точностью вычислена на основе биракционной теории^(4,5), хорошо согласующейся с опытом. Если потери тепла «теплоотводом» в сторону отходящего газа невелики в силу, например, длительного предварительного прогрева слоя отходящим газом, то количество тепла B в первом приближении может быть определено из следующего простого соотношения:

$$B \approx a \cdot w + T_{\text{в}} \cdot C_{\text{у}} \cdot (1 - w) + C_{\text{т}} \cdot T_{\text{в}},$$

где a —скрытая теплота испарения влаги w с учетом ее нагрева до 100° , $T_{\text{в}}$ —температура воспламенения угля в данных условиях, а $C_{\text{у}}$ и $C_{\text{т}}$ —теплоемкость соответствующих газообразованию количеств угля и дутья (с парами воды).

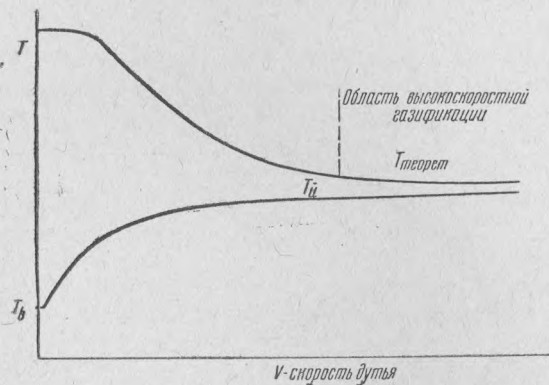
Ориентировочный подсчет показывает, что для слоя подмосковного угля (частицы 5—6 мм) величина B (при максимальной напряженности слоя) при ограниченном воспламенении составляет $\sim 10\%$ величины A .

Увеличение скорости дутья приводит к уменьшению величины $\frac{B}{A}$ ниже 0,1 и, очевидно, ведет к приближению $T_{\text{п}}$ и $T_{\text{теорет}}$ (фиг. 4).

При снижении скорости дутья отношение $\frac{B}{A}$ увеличивается и тем самым снижается температура процесса*.

Из сказанного выше совершенно ясны причины сжатия раскаленной зоны слоя и ее резкое очерчивание при увеличении линейной скорости дутья и концентрации кислорода.

При одностороннем отводе тепла вдоль слоя угля максимальная температура углеродной поверхности будет находиться вблизи второй границы кислородной зоны. Теплоотвод будет тем больше (при прочих равных условиях), чем короче размер кислородной зоны. Увеличение размера куска кроме изменения величины теплоотвода, ввиду изменения характера «теплопроводящей» среды, изменит также температурный градиент вследствие растяжения кислородной зоны**.



Фиг. 4. Изменение величины теоретической и фактической температуры процесса в конце кислородной зоны при увеличении скорости дутья.

пература процесса. Как уже указывалось, увеличение соотношения $\frac{B}{A}$ сильно снижает теоретическую температуру процесса при воздушном дутье. Снижение концентрации кислорода в воздушном дутье также довольно заметно снижает теоретическую температуру горящего слоя; при этом в зависимости от условий протекания процесса роль применяемых для разбавления воздуха газов различна.

Разбавление дутья паром или углекислотой может в некоторых условиях (высокоскоростное сжигание и газификация) действовать не только как фактор, снижающий концентрацию кислорода, но и как фактор, изменяющий тепловой эффект процесса и состав газа в кислородной зоне.

Роль пара в дутье однозначно определяется составом газа в кислородной зоне, и если в кислородной зоне отсутствует свободный водород, то примесь пара к дутью действует на температуру процесса*** как инертная при-

* Все рассуждения ведутся без учета потерь тепла стенками камеры горения, т. е. теплоотвода в направлении, перпендикулярном газовому потоку, но совершенно очевидно, что этот теплоотвод, сниженный в настоящее время в промышленных аппаратах до небольшой сравнительно величины, также снизит T_p , но обычно в меньшей степени, чем теплоотвод вдоль потока. В условиях, когда потери тепла через стенки приобретают заметное значение, ядро максимальных температур (изотермические поверхности) в слое также заметно изменяет свою конфигурацию.

** Зная размер кислородной зоны, газообразование по длине слоя, T_p и характер теплоотвода по слою, можно определить и максимальную температуру слоя и температурное поле в кислородной зоне.

*** Пар может действовать также в некоторой степени на величину B .

температура кислородной зоны с увеличением размера частиц топлива будет приближаться к теоретической температуре процесса.

Как мы выше установили при форсированном режиме горения, когда величина теплоотвода по слою относительно мала, фактическая температура газа и поверхности кокса в кислородной зоне близка теоретической температуре процесса. Следовательно, наиболее эффективным методом воздействия на фактическую температуру слоя в этих условиях будет снижение теоретической тем-

мень, только снижающая концентрацию кислорода. Чем меньше тепловой эффект процесса в кислородной зоне, тем, естественно, ниже температура кислородной зоны.

При газификации введение некоторого количества пара в дутье в большинстве случаев рационально, так как позволяет повысить калорийность газа. Введение большого количества пара в дутье нерационально, так как приводит к большим потерям с неразложившимся паром. Каждый процент пара, введенного в дутье свыше того, что разлагается в данных условиях, есть технически невозвратимая потеря, снижающая автоматически коэффициент полезного действия газогенератора.

Таким образом рационально допустимое снижение температуры процесса введением в дутье пара ограничено и при отсутствии в кислородной зоне (в объеме) водорода зачастую не позволяет снизить температуры углерода (кокса) в кислородной зоне до технически требуемых пределов. Более целесообразно в этих условиях введение в дутье не пара, а диспергированной воды.

Рассматривая такой случай работы слоя топлива, когда в зону горения попадает неподготовленное топливо или частично подготовленный непрогретый кусок, мы можем констатировать, что при этом фактическая температура в кислородной зоне будет снижаться, причем сильнее в том случае, если выделяющиеся в кислородной зоне пары воды будут разлагаться, а горючие компоненты не успеют сгореть.

В связи с приведенными выше замечаниями следует указать, что в технике не следует в некоторых случаях увлекаться применением сильно влажных топлив, так как в условиях, когда на испарение этой влаги идет тепло из зон высоких температур, рациональная организация процесса непосредственно газификации кокса будет затруднена, а иногда и невозможна. Наиболее правильной схемой газификации или сжигания сильно влажных топлив будет такая схема, при которой влага удаляется отдельным процессом, происходящим отдельно или в том же аппарате, но за счет применения для сушки низкотемпературного малоценного агента. Особенно целесообразна такая схема при обратном процессе газификации.

Рациональная организация теплового режима промышленных газогенераторов может повысить эффективность их работы и сэкономить значительное количество топлива.

Организация теплового режима возможна на базе теоретического анализа физико-химических процессов, происходящих в газогенераторе, и экспериментальных исследований лабораторного и полупромышленного характера, касающихся непосредственно процесса горения кокса, а также процесса подготовки топлива и его воспламенения.

Приведенный выше метод анализа тепловых условий процесса горения и газификации слоя топлива позволяет сделать некоторые весьма важные для техники выводы, касающиеся горения пылевидного топлива и, что особенно интересно, подземной газификации углей и сланцев различными методами.

Поступило
19 XII 1939

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Венстрем, ЖТФ, IX, вып. 17 (1939). ² В. И. Блинов, Тр. Воронежского ун-та, XI, вып. 1. ³ Д. А. Франк-Каменецкий, ЖТФ, IX, вып. 16 (1939). ⁴ З. Ф. Чуханов и Н. А. Каржавина, ЖТФ, IX, вып. 21 (1939); Отчет Ин-та азота за 1936 г. ⁵ З. Ф. Чуханов, ЖТФ, VIII, вып. 2 (1938). ⁶ З. Ф. Чуханов и Н. В. Лавров, Отчет ИГИ АН СССР за 1937 г.