

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

К ВОПРОСУ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ПОДЗЕМНОЙ ГАЗИФИКАЦИИ

В предыдущей работе (1) автор сделал попытку исследовать характер изменения температуры горящего или газифицируемого слоя твердого топлива в конце кислородной зоны при форсировке процесса горения и изменении некоторых других факторов, определяющих процесс. В основу работы был положен обычный метод теплового баланса. В отличие от более ранней работы М. А. Майерса (2), рассматривавшего* баланс всего слоя горящего топлива, в нашей работе задача с этой стороны была упрощена, что на первом этапе исследования, как мы увидим в дальнейшем, имеет свою положительную сторону.

Взятое в основу нашей работы положение о «теплоотводе» по слою, аналогичное «теплопроводности» слоя, положенной в основу работы М. Майерса, очевидно, достаточно близко соответствует действительному ходу тепловых процессов в слое топлива.

Мы не останавливаемся здесь на работе М. А. Майерса, которая, безусловно, представляет значительный интерес для исследования тепловых условий горения слоя твердого топлива, но имеет и серьезные недостатки, связанные с некоторыми необоснованными допущениями и, главным образом, с упрощением химической стороны процесса горения слоя твердого топлива.

В данной работе мы попытаемся, опираясь на упрощенную схему** анализа тепловых условий горения угля, принятую автором в первой работе, рассмотреть тепловые условия работы подземного газогенератора.

Прежде чем перейти к процессу подземной газификации, рассмотрим условия, при которых возможно перемещение очага горения в слое горящего топлива с неограниченным воспламенением и, следовательно, возможно «гашение» горячей индивидуальной частицы или горящего угольного слоя дутьевым потоком воздуха или даже кислорода.

Кусочек горящего угля (индивидуальная горящая частица угля в слое) может быть погашен при увеличении скорости дутья без изменения состава дутья только тогда, когда скорость теплоотвода будет больше, чем тепловыделение на поверхности горящего угля. Указанное соотношение может быть получено, очевидно, только в том случае, если скорость тепло-

* Автор ознакомился с работой М. А. Майерса после того, как была сдана в печать работа(1).

** Для полного (аналитического) решения всей задачи необходима еще длительная экспериментальная работа.

отвода от частичек будет расти быстрее, с увеличением линейной скорости дутья, чем скорость экзотермического процесса на поверхности угля. Легко показать, что указанное положение возможно только в «кинетической» или «переходной» областях процесса горения⁽³⁾, но не в диффузионной области.

Сказанное хорошо иллюстрируется фиг. 1, на которой приведена зависимость скорости горения углерода от температуры реакционной поверхности T и скорости газового потока v .

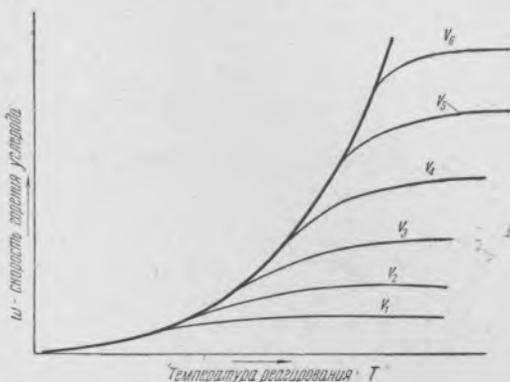
Основная кривая фиг. 1 соответствует кинетической области процесса горения, а кривые в правой части графика соответствуют диффузионной области. При увеличении скорости дутья при постоянной температуре наступит теоретически такой момент, когда процесс горения перейдет в кинетическую область, и тогда при дальнейшем увеличении скорости дутья будет наблюдаться «гашение» горячей частицы дутьевым потоком. Мы внешне при этом будем наблюдать, как раскаленная горящая частичка будет постепенно остывать, несмотря на усиленный подвод к ее поверхности кислорода*.

В этом случае будет наблюдаться внешне несколько на первый взгляд парадоксальное явление: углерод подготовлен и нагрет до температуры выше температуры так называемого воспламенения, кислород у реакционной поверхности имеется в избытке, и все же горение углерода прекращается.

Для процесса в слое горящего угля такой переход процесса в кинетическую область означал бы при увеличении скорости дутья «срыв пламени» даже при неограниченном воспламенении слоя. Практически явление срыва пламени при неограниченном воспламенении можно наблюдать при низкотемпературном горении слоя антрацита (весьма мало «активного» угля), когда очаг может «путешествовать» вдоль слоя при изменении линейной скорости дутья.

Совершенно очевидно, что явление гашения индивидуальной частицы и срыва пламени со слоя при неограниченном воспламенении не будет наблюдаться при предварительном подогреве дутья до «температуры воспламенения» углерода или кокса данного сорта угля. В этом случае переход в кинетическую область приведет к увеличению размера кислородной зоны при увеличении линейной скорости дутья.

В практических условиях работы горящего слоя в топках (в том числе и высокоскоростных) и даже в газогенераторах, где величина невозвратимых теплопотерь невелика, переход процесса горения в кинетическую область (или даже переходную, с заметным влиянием скорости реакции на суммарную скорость процесса) для большинства рабочих топлив мало вероятен.

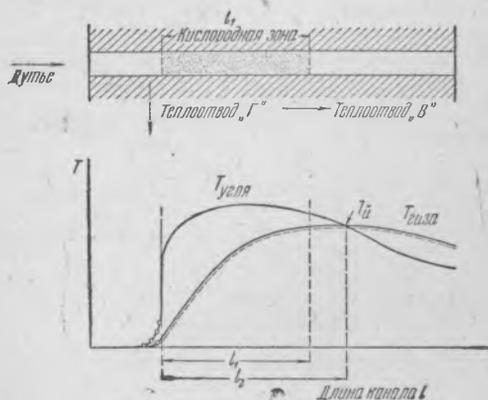


Фиг. 1. Теоретическая зависимость скорости гетерогенного процесса—горения углерода—от температуры реагирования при различных скоростях газового потока (v).

* Учет потерь тепла от горячей частицы теплоизлучением не меняет сделанных выводов.

В настоящее время наиболее созревшим и технически опробованным методом подземной газификации является метод потока. Более чем годовая эксплуатация Горловских панелей (крутопадающий пласт) доказала техническую возможность подземной газификации в этих условиях. По методу потока в настоящее время строятся промышленные станции в различных пунктах нашей страны.

В работе, посвященной некоторым вопросам подземной газификации, автор (3) отметил ряд отрицательных моментов, свойственных поточному методу подземной газификации угля. При этом было указано, что исключительно большое значение для стационарности процесса и даже его технической осуществимости имеет температурный режим процесса, который во многом определяет и управляемость процесса, происходящего под



Фиг. 2. Схема изменения температуры по длине углеродного канала.

землей, в частности вопрос передвижения зон газификации вдоль огневого забоя.

Рассмотрим, в каких условиях протекает процесс в подземном газогенераторе, и сделаем попытку исследовать его с точки зрения теплового баланса основной рабочей части панели—кислородной зоны, т. е. той части канала с односторонней угольной поверхностью, где в газовом объеме имеется кислород*.

В целике углерода ограниченных размеров имеется канал (фиг. 2), в котором создан очаг горения, и в некоторый момент времени t_1 кислородная зона,

имеющая линейный размер l_1 , находится в месте, изображенном на фиг. 2. Из уравнения теплового баланса, составленного для канала, ограниченного со стороны подачи дутья началом кислородной зоны, а с другой стороны плоскостью, в которой температура поверхности углерода и температура газа равны, может быть определена фактическая температура поверхности углерода в этой точке:

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

где A —тепловой эффект процесса, соответствующий составу газа в конечной точке участка l_2^{**} , B —«теплоотвод» вдоль канала по целику углерода, G —«теплоотвод» в угольный целик, $C_{\text{г}}$ и $C_{\text{к}}$ —соответствующие «теплоемкости» эквивалентных количеств газа и кокса.

В связи с тем что размер кислородной зоны в канале угольного целика имеет весьма значительные размеры, превышающие в десятки, а при широком канале в сотни раз размеры кислородной зоны в слое, то естественно, что для широкого канала величиной B можно пренебречь даже при малых скоростях дутья.

В этих условиях отношение между фактической температурой процесса и теоретической определится следующим соотношением:

$$\frac{T_{\text{п}}}{T_{\text{теор}}} = 1 - \frac{G}{A}.$$

* Условно ограничиваем кислородную зону концентрацией кислорода в газовом объеме канала выше 1 объемного процента.

** Разность $l_1 - l_2$ будет, повидимому, в практических условиях иметь незначительную величину.

Следует отметить, что ввиду малой величины теплоотвода B температура поверхности углерода по длине кислородной зоны мало изменяется, приближаясь при относительном уменьшении величины теплоотвода Γ к теоретическому значению.

В условиях турбулентного потока газа в канале выравниванию температуры газа и углерода будет способствовать догорание горючих газов* в объеме, так что в конце кислородной зоны величина T_{Π} мало будет отличаться от величины T_{Γ} .

Совершенно очевидно, что наличие в канале наряду с углеродной поверхностью инертной поверхности (порода) не изменит в принципе процесса и теплового режима, при этом произойдет только увеличение величины теплоотвода Γ .

Рассмотрим, однако, характер теплоотвода через целик и его значение для процесса. Прежде всего следует сказать, что при малой теплопроводности углерода и породы эта величина Γ не будет значительной и относительно будет падать при форсировке процесса, т. е. при увеличении скорости дутья. Величина $\Gamma - C_{\kappa}T_{\Pi}$ является невозвратимой потерей тепла.

Для определения точной картины изменения теплового поля в угольном целике во времени и для точного количественного решения нашей задачи необходимо вести расчет по общему дифференциальному уравнению теплопередачи (с соответствующими краевыми условиями).

Решение этого уравнения для нашего конкретного случая невозможно** без значительных, мало обоснованных упрощений.

Можно, однако, на базе имеющихся экспериментальных материалов говорить о порядке величины Γ и влиянии ее на температуру процесса и к. п. д. подземной панели, работающей методом потока.

Теплоотвод Γ в канале равнозначен для слоя теплоотводу внутрь газифицируемых частиц углерода (при отсутствии теплопотерь через стенки генератора). Легко показать, что в слое углерода величина $\Gamma - C_{\kappa}T_{\Pi} = 0$ и, следовательно, отсутствуют невозвратимые потери тепла. В условиях работы газогенератора невозвратимыми потерями тепла, внешне аналогичными теплоотводу Γ , являются потери тепла через стенки газогенератора в окружающее пространство.

Таким образом можно сделать вывод, что при газификации углеродного канала, при сведении невозвратимых теплопотерь $\Gamma - C_{\kappa}T_{\Pi}$ к незначительной относительно величине***, фактическая температура углеродной поверхности должна быть очень близкой теоретической температуре процесса, соответствующей газообразованию в конце кислородной зоны.

Характер газообразования полностью определяется (3) соотношением скоростей реакций:

- | | |
|-------------------------------------|---|
| а) $4C + 3O_2 = 2CO + 2CO_2$ | — реакция «окисления» углерода. |
| б) $2C + O_2 = 2CO$ | — реакция «горения» углерода. |
| в) $C + CO_2 + O_2 = 2CO + O_2 $ | — реакция восстановления углекислоты в кислородной зоне |
| г) $C + CO_2 = 2CO$ | — реакция восстановления углекислоты. |
| д) $2CO + O_2 = 2CO_2$ | — реакция горения окиси углерода в газовом объеме. |

В условиях широкого углеродного канала в связи с протеканием в газовом объеме реакции (д) в конце кислородной зоны следует ожидать

* Этот фактор совершенно не учитывается в работе Майерса.

** Изучение указанных процессов возможно путем теплового моделирования.

*** В промышленных условиях потери газогенератора и топки в окружающее пространство могут быть доведены до 2—5% величины A .

в газе почти чистую углекислоту и, следовательно, соответствующую ей теоретическую температуру процесса (с учетом диссоциации). Прибавка в дутье пара в этих условиях будет влиять на температуру практически только как разбавление кислорода дутья.

Рассмотрим, как изменится тепловой режим процесса при подземной газификации не углерода или кокса, а реального рабочего топлива, например подмосковного угля. Если горит крупный кусок угля, то возможно такое положение, что он неподготовлен в глубине куска и однако, если процесс горения начался, то он без изменения условий не прекратится, так как при выгорании верхнего слоя молекул углерода соседние слои молекул уже нагреваются до температуры, близкой температуре процесса. Погасить горящий уголек можно только, если искусственно понизить температуру зажатой поверхности. До тех пор пока горение углерода находится в так называемой диффузионной области, увеличением скорости потока воздушного или кислородного дутья погасить такой устойчиво горящий кусок угля невозможно, если при этом, конечно, не произойдет механического дробления куска. Температура горения такого куска угля будет ниже, чем температура горения куска кокса, так как величина теплоотвода G (внутри куска) вследствие затраты тепла на подготовку куска угля, в том числе испарение влаги и выделение летучих, будет в этом случае больше. Чем больше влажность внутри такого куска угля, тем, как уже указывалось в предыдущей работе, ниже фактическая температура процесса. Аналогичная картина будет иметь место и при подземной газификации одностороннего угольного канала, который в данном случае может рассматриваться как «крупный кусок» угля.

Величина теплоотвода G при работе с рабочим топливом может быть практически заметно увеличена только за счет испарения влаги, поступающей из породы и угольного целлика. Температура кислородной зоны также при этом будет снижена до сколь угодно малой величины, вплоть до того, что очаг может быть погашен. Но как мы уже видели выше, разность величины $G - C_p T_p$ при сухом дутье и коксе есть невозвратимая потеря, автоматически снижающая к. п. д. газогенератора.

При паро-воздушном дутье и сыром угле каждый лишний процент влаги, введенный в кислородную зону выше того, что может разложиться, давая водород, есть также невозвратимая потеря тепла. Так как требующееся для газификации количество пара весьма невелико и может снизить температуру (теоретическую) процесса незначительно— всего лишь $\sim 300^\circ$ *, то всякое дальнейшее снижение температуры за счет указанных факторов есть потеря тепла и снижение к. п. д. подземного газогенератора.

Снижение температуры за счет невозвратимых потерь тепла до 1400° для избежания шлакообразования** при работе на подмосковном угле (низкотемпературная газификация) приведет к автоматической потере только за счет этого фактора свыше 25% топлива.

Из всего сказанного можно сделать следующий вывод: подземная газификация угля методом потока должна практически идти при высокой температуре (близкой к теоретической) для всех сортов твердого топлива. Если условия залегания угля (сильное обводнение, с которым невозможно бороться, и другие факторы) не позволяют избежать сильного снижения температур и тем самым избежать невозвратимых теплопотерь, то может оказаться, что эксплуатация такого месторождения путем подземной газификации методом потока будет неэкономична.

* При введении всего пара в начальный участок кислородной зоны.

** Или для перемещения кислородной зоны путем перевода процесса в «кинетическую область».

Как мы уже видели выше, газификацию угольного целика трудно сопоставить с газификацией слоя угля. Скорее можно ее рассматривать как начальный период одностороннего горения отдельного куска в слое топлива.

Когда мы рассматривали случай горения слоя угля, зажженного в середине, то установили, что при изменении скорости дутья возможно передвижение очага горения и навстречу дутьевому потоку (малая скорость) и вдоль потока (большие скорости), по направлению движения дутья.

Как следует из всего сказанного, в канале, зажженном по середине, передвижение очага в диффузионной области горения возможно только в одном направлении—навстречу дутьевому потоку. Этот вывод так же верен, как верно то, что усилением скорости воздушного дутья невозможно погасить горящий уголек, если скорость процесса горения определяется практически скоростью подвода кислорода к реакционной поверхности углерода. Скорость передвижения кислородной зоны навстречу дутьевому потоку определится при решении указанной выше задачи изменения во времени температурного поля в угольном целике.

В условиях работы поточной панели подземного газогенератора наиболее правильно, очевидно, для решения задачи выравнивания огневого забоя в подземном газогенераторе искать и пути передвижения очага горения и пути управления его протяженностью.

Поступило
21 I 1940

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ З. Ф. Чуханов, ДАН, XXVI, № 4 (1940). ² M. A. Meyers, Trans. of the Am. Soc. of Mech. Eng. ³ З. Ф. Чуханов и М. Я. Сагайдак, Изв. АН СССР, Отд. техн. наук, № 8 (1939); З. Ф. Чуханов, Журн. техн. физ., IX, вып. 21 (1939).