

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР
УРАЛЬСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
имени С. М. КИРОВА

На правах рукописи

Г. Н. СУНЦОВ

003227 5 111 9132111

ПОВЫШЕНИЕ ТЕПЛОТВОРНОСТИ ГЕНЕРАТОРНОГО ГАЗА ПУТЕМ ПОДОГРЕВА ДУТЬЯ

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Свердловск
1956

Просим Вас и сотрудников Вашего учреждения, интересующихся темой диссертации, принять участие в заседании Ученого совета, посвященном защите, или прислать свои отзывы.

О дне и времени защиты за 10 дней будет опубликовано в газете „Уральский рабочий“.

Предварительно защита намечена на.....1956 г.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Адрес института: Свердловск, 2, Втузгородок, Уральский политехнический институт имени С. М. Кирова.

Телефоны: дирекции Д1-14-81, ученого секретаря Д1-85-86, доб. 68.

Дата отправки автореферата

Работа выполнена
Восточном научно-исследовательском институте
Топливоиспользования

В работе промышленных печей, в особенности в металлургическом производстве, имеет важное значение вопрос повышения калорийности генераторного газа при безостаточной газификации твердого топлива.

Из всех известных в технике способов особое место занимает способ повышения теплотворности генераторного газа путем подогрева дутья, вводимого в газогенераторы. Преимущество этого способа перед другими в том, что он позволяет с минимальными затратами средств заметно повысить калорийность генераторного газа.

Внесение в зону газификации физического тепла с дутьем позволяет получить, примерно, такое же количество потенциального тепла в газе. Физическое тепло используется в зоне высоких температур газогенератора на дополнительное разложение водяного пара, что и дает обогащение газа горючими компонентами. Это приводит к росту теплотворной способности генераторного газа.

Идея подогрева дутья, идущего в газогенераторы, известна давно, однако в промышленном масштабе, в обычных слоевых генераторах, этот способ повышения калорийности газа распространения не получил. Вместе с этим оставался далеко неизученным и сам процесс газификации.

В настоящей работе излагаются результаты исследований процесса газификации твердого топлива в плотном слое на подогретом дутье, проведенных во ВНИИТ под руководством автора.

На укрупненной лабораторной установке исследован процесс газификации коксика и Журицкого угля на подогретом дутье. Произведена промышленная проверка возможности и эффективности применения подогретого дутья для получения газа с повышенной калорийностью. Установлена зависимость состава газа и его калорийности от температуры подогрева дутья и присадки пара. Дана оценка и выбран рациональный способ применения подогрева дутья в слоевых газогенераторах и составлены рабочие проекты для ряда заводов. По разработанным проектам сооружены и введены в эксплуатацию три установки в мартеновском цехе Н.-Сергинского завода для подогрева генераторного дутья теплом дымовых газов сталеплавильных печей. Испытания работы генераторов на горячем дутье, а также многолетняя эксплуатация полностью подтвердили результаты лабораторных исследований.

Наряду с получением суммарных характеристик работы ге-

нераторов на подогретом дутье проведенные зональные исследования на лабораторной установке при помощи специальной методики позволили просто и надежно получить данные по динамике газообразования и сделать анализ работы отдельных зон топливного слоя.

Данные этой части работы не только подтвердили существующие до сих пор представления о течении процесса в слое на паровоздушном дутье, но и обнаружили ряд новых закономерностей.

1. Лабораторные исследования газификации коксика на подогретом дутье

Лабораторная установка состояла из генератора диаметром 300 мм, электроподогревателя дутья и системы газоочистки (циклон, холодильник, электрофильтр).

Газифицировался коксик узкой фракции 15—25 мм следующего состава:

$$\begin{array}{lll} W^p = 5,2\% & C^c = 98,49\% & (N + O)^c = 0,72\% \\ A^c = 11,33\% & H^c = 0,24\% & S_{\sigma\sigma}^c = 0,55\% \end{array}$$

В течение экспериментов проводились все необходимые замеры и определения для получения объективных суммарных характеристик работы газогенератора на подогретом дутье. В целях изучения внутрислоевых процессов, протекающих в генераторе при различных температурах подогрева дутья и различной присадке пара, была разработана специальная методика отбора пробы газа.

Основным элементом этой методики являлась водоохлаждаемая с двойными стенками дугообразная, газозаборная трубка с наружным диаметром 5,4 мм и узкой щелью (шириной 0,1 и длиной 40 мм), направленной навстречу потоку газа.

В отличие от уже известных способов забора проб газа из горящего топливного слоя, газозаборная трубка и водоохлаждаемая термопара вводились через крышку генератора и ставились на слой топлива в средней его части.

По мере выгорания топлива и поступления новых его порций, трубка и термопара, под действием собственного веса и приведенного к ним груза, погружались в слой и двигались вместе с ним, проходя все зоны процесса, начиная от верхней поверхности слоя и, кончая зоной шлака. Такой способ отбора газа и замера температуры позволял получать усредненную его пробу по длине нескольких диаметров кусков на любом горизонте.

Специально поставленные опыты с различным диаметром трубок и различной длиной щели не обнаружили заметных влияний размера их на состав газа.

В результате опытов получены суммарные показатели про-

цесса и данные, характеризующие течение процесса газообразования в слое.

В число суммарных показателей вошло:

- а) качество газа, полученное при анализе проб, отобранных непосредственно на слое в средней его части, так как эта часть слоя наименее подвержена вредному влиянию стенок шахты;
- б) коэффициент полезного действия газификации. При определении его, наряду с потенциальным теплом газа и топлива, учитывалось также физическое тепло дутья, т. е.

$$\eta = \frac{Q_n^c V_2}{Q_m + q_{ф. д}},$$

где Q_n^c — теплотворная способность сухого газа, $ккал/нм^3$;

V_2 — выход газа, $нм^3/кг$;

Q_m — теплотворность топлива, $ккал/кг$;

$q_{ф. д}$ — физическое тепло дутья, $ккал$.

в) коэффициент перехода физического тепла дутья в потенциальное тепло газа — коэффициент трансформации — Θ

$$\Theta = \frac{(Q_n^c V_2) - (Q_n^{c'} V_2')}{q_{дуть} - q'_{дуть}},$$

где Q_n^c , V_2 — теплотворная способность сухого газа и его выход на килограмм топлива при заданной температуре подогрева;

$Q_n^{c'}$, V_2' — то же при „холодном“ неподогретом дутье;

$q_{дуть}$ — физическое тепло дутья, $ккал/кг$ при заданной температуре;

$q'_{дуть}$ — то же при неподогретом дутье.

г) коэффициент разложения пара

$$f = \frac{H_2}{H_2 + H_2O},$$

где H_2 , H_2O — содержание соответственно H_2 и H_2O в газе, %.

Было поставлено несколько серий опытов на дутье, подогретом до 50, 200, 400, 500, 700 и 840°С при различных увлажнениях дутья. Варьированием присадкой пара устанавливалось оптимальное ее значение для каждой температуры подогрева дутья.

Опытами установлено, что для дутья, подогретого до 200°С, оптимальная присадка пара — 171,2 $г/нм^3$. Для дутья, подогретого до 400°С, присадка 214 $г/нм^3$, для 500°С присадка 315 $г/нм^3$ и для 700°С — 513 $г/нм^3$.

Во всех опытах с этими присадками пара показатели процесса газификации выше, а именно теплотворная способность газа, к. п. д., коэффициент разложения пара и др. получились бо-

лес высокими, а содержание балласта ($\text{CO}_2 + \text{N}_2$) в этих опытах наименьшее. Опыты показывают, что с увеличением температуры подогрева дутья от 50 до 840°C и присадки пара с 112 до 648 г/нм^3 происходит увеличение CO_2 , некоторый спад CO и резкое увеличение содержания H_2 .

Калорийность сухого газа повышается от 1204 до 1537 ккал/нм^3 , а калорийность влажного газа изменяется от 1197 до 1366 ккал/нм^3 . Коэффициент разложения пара с повышенным температурой подогрева дутья падает от 94,0 до 76,7%. Коэффициент трансформации тепла в преобладающем большинстве опытов изменялся от 0,89 до 1,43 и в среднем составлял 1,0 (без учета к. п. д. воздухоподогревателя).

Это говорит о том, что физическое тепло, вводимое в генератор с дутьем, практически полностью превращается в химическое тепло газа.

Наличие величины коэффициента трансформации больше единицы может быть объяснено, помимо ошибок замеров (в частности неточностей, допускаемых в анализе газа и в определении его количества), также и тем, что с увеличением подогрева дутья сокращается содержание балласта ($\text{CO}_2 + \text{N}_2$) в газе. Выход газа падает, вследствие этого доля физического тепла газа, уносимого из генератора сокращается, и это тепло также превращается в химическое тепло газа, последнее находит подтверждение в некотором росте коэффициента полезного действия газификации.

В результате послойных замеров получено, что процесс газобразования по высоте слоя топлива, независимо от количества, поданного пара и подогрева дутья, имел две характерные зоны: кислородную и восстановительную.

Горизонт, на котором CO_2 достигало своего максимума, а содержание O_2 составляло порядка 2%, назван границей между кислородной и восстановительной зонами. С этого сечения начиналось резкое увеличение CO и H_2 и уменьшение CO_2 . Здесь практически полностью заканчивались реакции с кислородом и начинали развиваться реакции восстановительные. Опытами установлено, что высота кислородной зоны не зависит от присадки пара и температуры подогрева дутья и составляет везде одну и ту же величину — 40–50 мм, что соответствует примерно трем первоначальным диаметром куска топлива.

Кислородная зона представляет собой неоднородную среду, претерпевающую значительные изменения по мере выгорания углерода. Примерно, половина углерода топлива, поданного в газогенератор, дойдя до кислородной зоны, выгорает. Диаметр отдельных кусков топлива, определенный расчетом по анализу газа, значительно уменьшается.

В связи с этим топливная засыпка уже к началу кислородной зоны приобретает, видимо, более пористую структуру. Возрастает относительное количество золы, т. к. поверхность топлива покры-

вается зольной оболочкой. В этих условиях совершенно естественно имеет место различная завершенность процесса в одном и том же сечении слоя и отсутствие изотермических плоскостей. Очевидно, как поверхность одинаковых концентраций, так и поверхность одинаковых температур в слое имеет весьма неровную микрофакельную форму. Такой характер протекания процесса в кислородной зоне подтверждается одновременным присутствием в пробе газа O_2 , H_2 и CO .

Как видно из анализа состава газов при газификации коксика на подогретом дутье, при условии удаления шлака в твердом виде, процесс взаимодействия углерода топлива с кислородом дутья шел с получением как CO_2 , так и CO .

Причем выход CO_2 был значительно выше, чем CO . К концу зоны максимальное значение CO_2 в сухом газе во всех опытах составило 16,8%, а CO — 5%. Эти величины не зависели от количества поданного пара в дутье и температуры его подогрева.

С изменением присадки пара в дутье от 112 до 648 г/нм³ содержание H_2 менялось в среднем от 2 до 5%, считая на весь объем сухого газа.

Из данных опытов видно, что водяной пар вступал во взаимодействие с углеродом в тех участках, где кислород практически отсутствовал. В тех же участках, где кислород не успел прореагировать и где шли еще окислительные реакции, содержание H_2 и CO было практически ничтожным.

Опытами зафиксировано падение максимальной температуры в конце зоны на 100° С с изменением присадки пара от 112 до 648 г/нм³ и подогрева дутья от 50 до 840° С.

Полученные в опытах данные показывают, что характер работы восстановительной зоны в зависимости от присадки пара и подогрева дутья не оставался постоянным, как это имело место в работе кислородной зоны. С ростом присадки пара при всех температурах подогрева дутья наблюдалось снижение интенсивности и даже прекращение восстановления CO_2 . Так в опытах с большими присадками пара (550—650 г/нм³) количество CO_2 в газе по высоте всей восстановительной зоны оставалось постоянным, т. е. CO_2 было столько, сколько его образовалось в конце кислородной зоны. Здесь реакция восстановления CO_2 затормаживалась H_2O или скорость реакции восстановления $CO_2 + C$ становилась одинаковой со скоростью реакции водяного газа. С ростом присадки пара наблюдалось также увеличение содержания H_2 в газе. Причем, интенсивность образования H_2 была значительно выше в начальных слоях восстановительной зоны, сразу же после исчезновения кислорода, чем в верхних слоях топлива. Наряду с ростом содержания H_2 увеличивалось и содержание CO , но этот рост не зависел от присадки пара в дутье. Количество CO в каждом отдельно взятом сечении слоя имело практически постоянную величину во всех опытах и при всех присадках пара.

Таким образом видно, что зона восстановления на различных участках по высоте слоя топлива работала неодинаково. Нижний участок ее высотой 60—100 мм характеризуется наиболее интенсивным восстановлением CO_2 и разложением H_2O . Верхний участок высотой 250—300 мм (при общей высоте топлива 500—600 мм) характерен более плавным изменением количеств, образующихся CO_2 , CO и H_2 . И чем ближе к концу восстановительной зоны, тем медленнее происходят эти изменения.

Исследования процесса газообразования позволили определить K_{on} — опытную константу равновесия реакции водяного газа $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO}_2 + \text{H}_2$ по высоте слоя топлива в зависимости от присадки пара в дутье и в зависимости от температуры.

В тех участках конца кислородной зоны, где кислород практически полностью отсутствовал, эта константа равна $K_{теор}$ — т. е. рассчитанной на основе термодинамического равновесия.

Последнее, видимо, имеет место в забалластированной водяным паром среде, при температурах зоны 1350—1450° С. На высоте 200 мм и выше с умеренными присадками пара K_{on} меньше $K_{теор}$ и составляет на выходе из зоны восстановления 1,2—1,6. При больших присадках пара K_{on} равна $K_{теор}$ по всей высоте слоя.

Измерения температуры и состава газа по высоте слоя позволили составить тепловые балансы отдельных зон топливного слоя. Для этой цели использовано уравнение теплового баланса слоя переменной высоты, отсчитываемой от конца шлаковой подушки.

$$Q_{\phi. m} + Q_{x. m} + Q_{\phi. \partial} = Q'_{\phi. z} + Q'_{x. z} + q_{пот}$$

В этом уравнении:

1. $Q_{\phi. m}$ — физическое тепло углерода топлива

$$Q_{\phi. m} = \frac{12V_z(\text{CO}_2 + \text{CO}) C_p t}{N_2^z} \text{ ккал/моль } N_2.$$

2. $Q_{x. m}$ — химическое тепло от реакции полного сгорания углерода топлива

$$Q_{x. m} = \frac{12V_z(\text{CO}_2 + \text{CO}) Q_{y_{zл}}}{N_2^z} \text{ ккал/моль } N_2.$$

3. $Q_{\phi. \partial}$ — физическое тепло, внесенное в слой подогретым дутьем

$$Q_{\phi. \partial} = \frac{V_{\partial ym} C_p t_{\partial}}{N_2^z} \text{ ккал/моль } N_2.$$

4. $Q'_{\phi. z}$ — физическое тепло газа

$$Q'_{\phi. z} = \frac{V_z C_p^z t}{N_2^z} \text{ ккал/моль } N_2.$$

5. $Q'_{x.2}$ — химическое тепло газа

$$Q'_{x.2} = \frac{V_2 Q_H^{gl}}{N_2^2} \text{ ккал/моль } N_2.$$

В приведенных выше уравнениях:

V_2 — объем (нм^3) влажного газа, проходящего в единицу времени через сечение слоя на данной высоте;
 CO_2, CO — содержание CO_2 и CO во влажном газе на высоте h (в процентах);

t — температура слоя, $^{\circ}\text{C}$;

C_p — теплоемкость твердого топлива;

Q_{ygl} — теплота реакции углерода с кислородом до CO_2 , ккал;

t_d — температура дутья, $^{\circ}\text{C}$;

C_p^2 — средняя теплоемкость газа, ккал/ $\text{нм}^3 \text{ } ^{\circ}\text{C}$;

Q_H^{gl} — калорийность влажного газа, ккал/ нм^3 ;

N_2^2 — содержание азота во влажном газе, %.

В результате замеров получено, что химическое тепло топлива в конце кислородной зоны составляет, примерно, половину всего количества химического тепла, участвующего в процессе.

В самом начале зоны восстановления на высоте 60—100 мм, происходит дальнейшее интенсивное изменение $Q_{x.m}$, которое к концу зоны прекращается. Физическое тепло газа и q потерь имеют наибольшую величину в точке перегиба температур, т. е. при ее максимальном значении. Увеличение присадки пара и температуры подогрева дутья не влияют на величину потерь. Основным источником тепла в кислородной зоне является реакция $\text{C} + \text{O}_2 = \text{CO}_2$.

С увеличением присадки пара в дутье происходит увеличение суммы прихода тепла как на выходе из кислородной, так и на выходе из восстановительной зоны.

На основании данных экспериментов сделана попытка дифференцировать процесс, т. е. произвести разделение диффузионных факторов от кинетических и затем определить константы скорости основных реакций восстановительной зоны — $\text{C} + \text{CO}_2$ и $\text{C} + \text{H}_2\text{O}$ по закону Аррениуса — $K = K_0 e^{-\frac{E}{RT}}$. Однако получить какую-либо зависимость не представилось возможным. Это объясняется видимо тем, что имеет место протекание как поверхностных, так и объемных реакций, для учета последних нет данных.

Кроме того, слой из крупнокускового материала не позволяет точно учесть величину его реакционной поверхности, температуру слоя и т. п.

Исследования процесса газообразования и литературный обзор показывают, что наиболее надежные данные для расчета со-

става газа на паровоздушном дутье получаются при учете термодинамических констант, которые отражают суммарные результаты реакций, протекающих на поверхности и в объеме.

II. Газификация Журинского угля на подогретом дутье в лабораторных и промышленных условиях

Так как промышленные генераторы Урала в основном отапливаются генераторным газом, полученным не из «коксика», а из каменного угля марки «Д», в частности Журинского, то возникла необходимость провести лабораторные опыты с целью выяснения, как ведет конкретно этот уголь в генераторе, работающем на подогретом дутье, а также определить исходные данные для расчета опытной промышленной установки.

Был проведен ряд опытов с подогревом дутья до 400° и различной присадкой пара на той же установке, где велись и исследования по газификации коксика.

Полученные в опытах данные по своему характеру аналогичны данным при газификации коксика. С увеличением температуры подогрева и соответствующей присадки пара имело место увеличение калорийности газа за счет роста содержания водорода. В частности в опытах с подогревом дутья до 400° С, содержание H_2 изменилось с 12,8 до 20,3%, содержание СО с 30,3 до 27,3%. Прирост калорийности сухого газа составил 131, а влажного — 60 ккал/нм³.

На основании данных лабораторных исследований и аналитических расчетов произведено сопоставление различных методов подогрева дутья, в том числе с использованием физического тепла дымовых газов и физического тепла генераторного газа.

В результате чего получена оценка и выбран способ промышленного применения подогрева дутья для слоевых генераторов. Составлены рабочие проекты промышленных установок по подогреву дутья за счет использования физического тепла продуктов горения мартеновской печи № 3 Н.-Сергинского завода и за счет физического тепла генераторного газа на одном из генераторов завода № 705.

Первый проект был осуществлен и установка введена в эксплуатацию в 1952 г. Она состоит из 2-х секционного трубчатого рекуператора, установленного у дымогарной трубы мартеновской печи и выполненного из обыкновенных труб с наружным диаметром 51 мм и высотой 3 метра. Внутри труб проходят дымовые газы. Снаружи они омываются паровоздушной смесью. Продукты горения из борова через рекуператор отсасываются дымососом. Воздух подается вентилятором высокого давления. Перед рекуператором к воздуху добавляется пар в количестве, необходимом для процесса газификации.

Нагретая в рекуператоре паровоздушная смесь подается к газогенераторам по теплоизолированному трубопроводу длиной 50 метров с внутренним диаметром 500 мм.

Трехлетняя эксплуатация установки показала, что при газификации Журинского угля на дутье, подогретом до 200—230°С, процесс протекает вполне устойчиво. Имеет место увеличение калорийности сухого газа с 1490 до 1580 ккал/нм³. Содержание СО₂ в сухом газе составляет 3,7—4,5%; СО = 29,8—30,7%; Н₂ = 18—19%.

С переходом на работу с подогретым дутьем создан резерв по тяге у мартеновской печи, за счет отсоса дыма через рекуператор. Все это заметно улучшило работу мартеновской печи и длительность плавки сократилась в среднем на 30 минут.

Ввиду того, что рассматриваемое мероприятие дало положительные результаты, Главуралмет принял решение распространить опыт работы установки по подогреву дутья на другие заводы.

Автором были выполнены аналогичные проекты промышленных установок для двух других печей Н.-Сергинского завода и мартеновской печи № 1 Северского и № 2 Алапаевского заводов.

К настоящему времени из указанных проектов реализован первый, т. е. на Н.-Сергинском заводе на всех 3 печах смонтированы установки по подогреву дутья.

Результаты проведенной работы позволяют сделать следующие выводы:

1. Способ повышения калорийности газа путем подогрева дутья является перспективным и эффективным при утилизации тепла отходящих продуктов горения высокотемпературных печей, а также при использовании физического тепла газа, выходящего из шахты генератора.

2. Лабораторные исследования и промышленные испытания генераторов, работающих на подогретом дутье, показывают, что с увеличением температуры подогрева дутья происходит изменение состава газа:

а) растет содержание Н₂ с 9,2 до 25,4% (на коксике при подогреве дутья до 840° и присадке пара до 648 г/нм³) и с 12,8 до 20,3% (на Журинском угле при подогревом дутье до 400°С и присадке пара 175 г/нм³);

б) незначительно снижается содержание СО как в том, так и в другом случае;

в) уменьшается балласт газа (на коксике с 58,8 до 45,6%).

Это изменение состава газа с нагревом дутья приводит к повышению теплотворной способности сухого газа на коксике с 1204 до 1537 ккал/нм³ и на Журинском угле с 1442 до 1573 ккал/нм³.

3. С увеличением присадки пара при соответствующих температурах подогрева дутья наблюдается рост содержания влаги в газе. Увеличение влаги газа снижает величину прироста калорийности влажного газа в сравнении с приростом калорийности сухого газа с 333 до 169 ккал/нм³ (на коксике) и с 131 до 60 ккал/нм³ на Журинском угле (в лабораторных условиях).

4. Коэффициент разложения пара с увеличением его присадки падает.

5. Коэффициент полезного действия газификации с учетом физического тепла дутья растет.

6. Коэффициент трансформации тепла, т. е. коэффициент перехода физического тепла дутья в потенциальное тепло газа, в среднем равен единице.

7. В процессе газификации независимо от подогрева дутья и присадки пара в кислородной зоне высотой 40—50 мм происходит интенсивное тепловыделение. Основным источником тепла является реакция горения кислорода с углеродом до CO_2 . Содержание CO и H_2 незначительно. Очевидно разложение водяного пара имеет место в тех участках кислородной зоны, где уже отсутствует O_2 .

8. Высота восстановительной зоны составляет 300—350 мм. На этой высоте все реакции заканчиваются.

По характеру работы восстановительная зона имеет два участка: нижний, высотой 60—100 мм и верхний — 250—300 мм. Нижний участок характеризуется интенсивным разложением H_2O и восстановлением CO_2 . Для конечного участка характерно более плавное изменение выходов CO_2 , CO и H_2 .

Увеличение присадки пара и подогрева дутья снижает интенсивность восстановления CO_2 .

Продуктами первичных реакций в зоне восстановления следует считать CO и H_2 .

9. Опытная константа равновесия K_{on} реакции водяного газа в нижних участках зоны восстановления равна рассчитанной по равновесным соотношениям $K_{теор}$.

На выходе из слоя при невысоких присадках пара K_{on} меньше $K_{теор}$. При больших присадках пара K_{on} равна $K_{теор}$ по всей высоте слоя.