

2. Братчиков С.Г. Теплотехника окускования железорудного сырья. — М.: Металлургия, 1970. — 342 с.

3. Котов В.Г. Оценка степени развития окислительно-восстановительных реакций по составу агломерационных газов // Сб. Использование природного газа в промышленности. — Киев: Наукова думка, 1976. — С. 21–25.

4. Коротич В.И., Климова Н.С., Пузанов В.П. Расчет окислительно-восстановительных процессов при агломерации железорудных материалов // Сб. Окускование железных руд и концентратов. УРАЛМЕХАНОБР, 1973. — № 1. — С. 45–53.

5. Ефименко Г.Г., Княжанский М.М., Григорьев Э.Н. и др. Роль окислительно-восстановительных процессов при агломерации тонко-измельченных окомкованных железорудных материалов // Сб. Физико-химия прямого получения железа. — М.: Наука, 1977. — С. 162–165.

6. Расширение диапазона частот измерения колебаний состава отходящих агломерационных газов / Попов А.Л., Дяков Ю.А., Пархоменко А.Д. и др // Донец. Политех. Ин-т. — Донецк, 1989. — 8 с.

7. Коротич В.М. Основы теории и технологии подготовки сырья к доменной плавке. — М.: Металлургия, 1978. — 206 с.

8. Каплун Л.И., Коротич В.И. Окислительно-восстановительные реакции оксидов железа и их роль в механизме формирования железорудных агломератов // Изв. вузов. Черная металлургия, 1990. — № 8. — С. 11–15.

*© Попов А.Л., Сафонова Е.К., Сафьянц С.М., Константинов Г.Е., 2002*

БОЧКА В.В., ТАРАКАНОВ А.К., ЗУБРИЦКИЙ А.П. (НМЕТАУ)

## **НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ШИХТЫ И ГАЗОВ ПО ОКРУЖНОСТИ ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ ШАХТЫ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ БОЛЬШОГО ОБЪЕМА**

*Выполнен анализ влияния различных факторов на окружное распределение материалов и газов в доменной печи.*

*Приведено обоснование механизма образования неравномерности распределения материалов и газов по окружности доменной печи большого объема.*

Одним из важнейших факторов, определяющих в значительной степени эффективность противотока шихты и газов в рабочем пространстве и в конечном итоге — технико-экономические показатели плавки является распределение шихты и газов по окружности доменной печи [1, 2].

Опыт работы различных доменных печей показывает, что распределение материалов и газов по окружности колошника должно быть в максимальной степени равномерным. При этом степень достижения этой равномерности на каждой доменной печи зависит от условий ее работы, типа загрузочного устройства и особенно — от характера распределения шихты и газов по радиусу верхней части шахты.

Наличие взаимосвязи радиального и окружного распределения шихты и газов в шахте печи отмечается многими исследователями [3–6]. Однако объяснения этой связи существенно отличаются. Так, в работах [3, 4] указывается, что при подгрузке периферийной зоны железорудными материалами неравномерность окружного распределения по среднеквадратическому отклонению температуры периферийного газа возрастает. В отличие от этого, в работе [6] отмечается уменьшение перепада между максимальным и минимальным значениями температур периферийного газа при подгрузке этой зоны рудными материалами. В то же время в этих работах независимо друг от друга делается весьма важный вывод о том, что уменьшение разности температур по окружности печи не должно быть самоцелью, так как выравнивание температур периферийных газов не

всегда обеспечивает равномерную работу печи по ее окружности, высокие экономические показатели плавки. В работе [5] не обнаружено влияние равномерности распределения шихты по радиусу печи на распределение газа по окружности периферийной зоны. Однако отмечается, что при изменении равномерности окружного распределения материалов газовый поток перераспределяется не только по окружности, но и в радиальном направлении.

Результаты приведенных исследований свидетельствуют о том, что характер взаимосвязи радиального и окружного распределения материалов и газов зависит от условий работы доменных печей. В то же время отсутствие объяснения механизма формирования этой связи существенно затрудняет выбор и обоснование рационального распределения шихты и газов по окружности верхней части доменной печи.

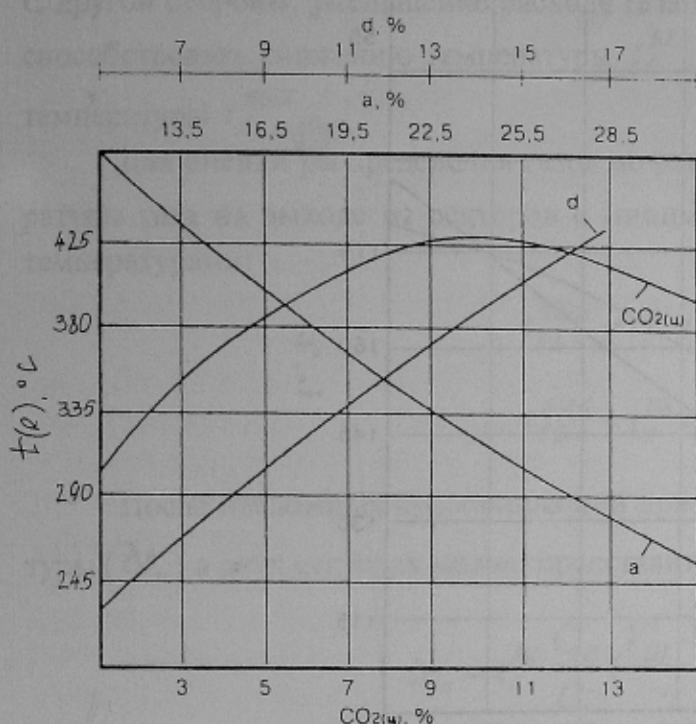


Рис. 1. Взаимосвязь температуры периферийных газов с распределением содержания  $\text{CO}_2$  по радиусу печи

$t_n(R)$  и средней температурой газов  $\bar{t}_n$  существует достоверная связь. Как видно из рис. 1, увеличение содержания  $\text{CO}_2$  в центре шахты приводит к росту  $t_n(R)$ . Причиной этого следует считать уменьшение содержания  $\text{CO}_2$  на периферии вследствие перераспределения газового потока по радиусу печи, о чем говорит изменение показателей "a"= $(\text{CO}_2_{\text{тр}} - \text{CO}_2_{\text{пер}}) + (\text{CO}_2_{\text{тр}} - \text{CO}_2_{\text{ш}})$ , % и "d"= $(\text{CO}_2_{\text{пер}} + \text{CO}_2_{\text{ш}})/2$ , % на данном рисунке. Об усилении газового потока на периферии свидетельствует также и рост средней температуры  $\bar{t}_n$  (рис. 2). В то же время установлено, что неравномерность распределения газов по окружности колошника в значительной степени зависит от распределения шихты и газов по радиусу печи. Как видно из рис. 2, изменение радиального распределения материалов в сторону уменьшения загрузки периферии рудными материалами и увеличения периферийного потока газов (рост  $\bar{t}_n$ ) приводит к увеличению неравномерности распределения газов по окружности (рост  $\Delta t_n$ ). Вместе с тем необходимо подчеркнуть, что связь  $\Delta t_n$  с содержанием  $\text{CO}_2$  в газе на периферии оказалась недостоверной.

В связи с этим на доменной печи № 9 меткомбината «Криворожсталь», оборудованной бесконусным загрузочным устройством, было проведено изучение взаимосвязи распределения шихты и газов по радиусу и окружности шахты и ее влияния на технико-экономические показатели плавки. Характер распределения шихты и газов по радиусу верхней части шахты оценивался по кривой  $\text{CO}_2 = f(R)$ , температуре у стен печи, измеренной при радиальном зондировании —  $t_n(R)$ , а также по средней температуре периферийного газа —  $\bar{t}_n$ . В качестве показателя окружного распределения газов использовалась разность между максимальным и минимальными значениями температуры периферийного газа —  $(\Delta t_n)$ .

Анализ результатов исследования показал, что между содержанием  $\text{CO}_2$  в радиальном газе, температурой

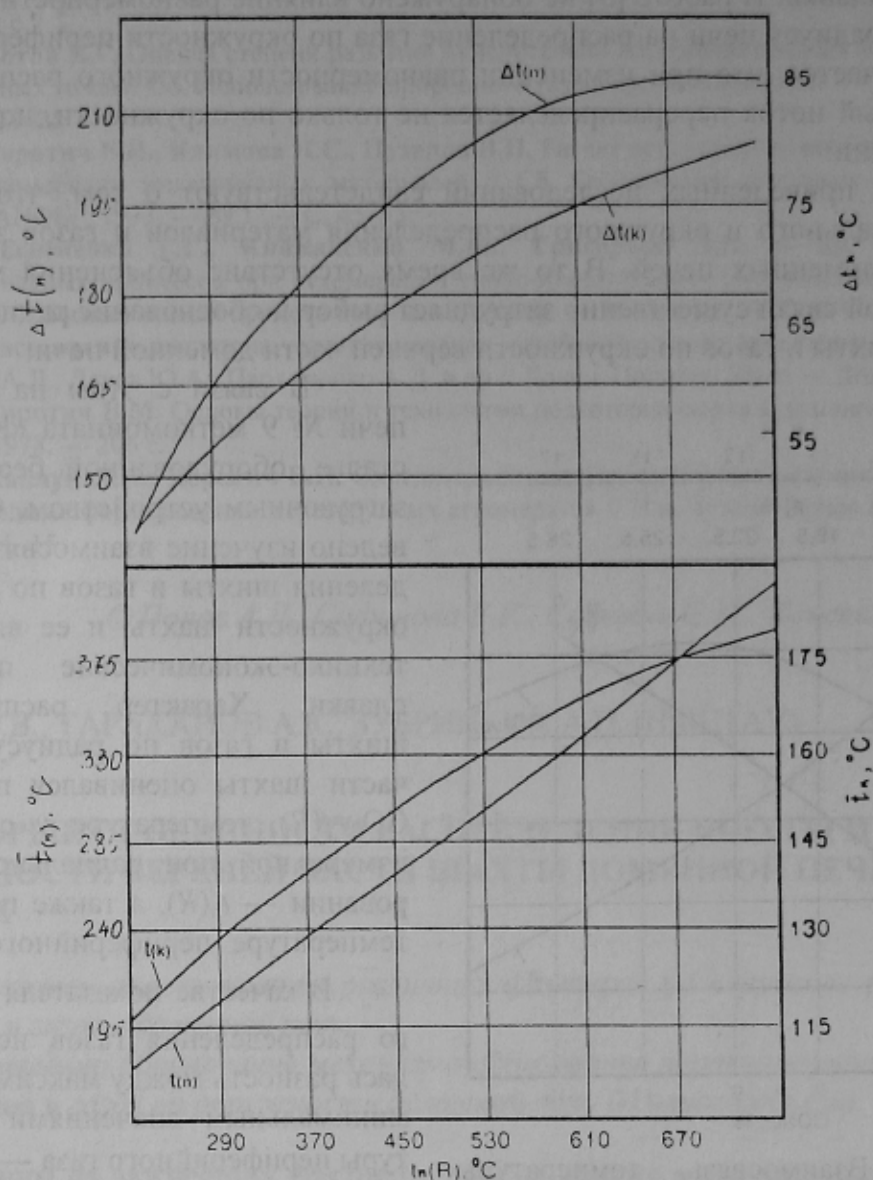


Рис. 2. Зависимость окружной неравномерности распределения газов ( $\Delta t_n$  и  $\Delta t_k$ ) и средних величин температуры ( $\bar{t}_n$  и  $\bar{t}_k$ ) от температуры газов  $t_n(R)$

Указанный характер изменения  $\Delta t_n$  можно объяснить особенностями протекания тепло- и массообмена в пристенной зоне доменной печи при различной степени подгрузки ее рудными материалами. Для объяснения этого воспользуемся теорией теплообмена для зоны столба материалов с отношением водяных эквивалентов шихты ( $W_{ш}$ ) и газов ( $W_r$ ) меньше 1,0 [7]. Рассмотрим закономерности формирования температуры колошникового газа для периферийной зоны определенной ширины и высотой  $h$ , разделенной по окружности на  $n$  секторов.

В соответствии с данной теорией, при идеальных условиях (время нагрева шихты бесконечно большое, в шихте отсутствует влага, не происходит разложение карбонатов и т.д.), температура газа на выходе из данной зоны ( $t_r^{вых}$ ) может быть определена из выражения:

$$t_r^{вых} = t_r^{вх} \left(1 - \frac{W_{ш}}{W_r}\right) = t_r^{вх} \left(1 - \frac{V_{ш} \cdot C_{ш}}{V_r \cdot C_r}\right), \quad (1)$$



где  $t_r^{BX}$  — температура газа на входе в зону;  $W_{ш}$  — водяной эквивалент шихты;  $V_{ш}C_{ш}$  — расход шихты и ее теплоемкость;  $W_r$  — водяной эквивалент газа;  $V_rC_r$  — количество газов и их теплоемкость.

Как видно из данного выражения, температура газов на выходе из столба шихты высотой  $h$  в периферийной зоне зависит от температуры газа на входе в эту зону и от соотношения водяных эквивалентов ( $W_{ш}:W_r = u$ ). Чем больше часовой расход шихты на единицу газа (изменения  $C_{ш}$  и  $C_r$  в данной зоне несущественны) в этой зоне, тем ниже температура газа и, наоборот, — при его уменьшении. Следовательно, при подгрузке периферийной зоны рудными материалами температура  $t_r^{BYX}$  будет снижаться. С другой стороны, уменьшение расхода газа в этой зоне при подгрузке ее рудой будет способствовать снижению температуры  $t_r^{BX}$ , что также будет приводить к снижению температуры  $t_r^{BYX}$ .

Для оценки распределения газов по окружности необходимо сопоставить температуры газа на выходе из секторов с минимальной ( $t_{r1}^{BYX}$ ) и максимальной ( $t_{r2}^{BYX}$ ) температурами:

$$t_{r1}^{BYX} = t_r^{BX} (1-u_1); \quad (2)$$

$$t_{r2}^{BYX} = t_r^{BX} (1-u_2). \quad (3)$$

После несложных преобразований при  $C_{ш}^1 = C_{ш}^2$  и  $C_r^1 = C_r^2$ , перепад температуры ( $\Delta t_n$ ) в двух секторах можно представить:

$$\Delta t_n = t_r^{BX} \frac{C_{ш}}{C_r} \left( \frac{V_{ш}^1 \cdot V_r^2 - V_{ш}^2 \cdot V_r^1}{V_r^1 \cdot V_r^2} \right), \quad (4)$$

где индексы 1 и 2 — номера секторов.

Из данных выражений видно, что перепад температур между секторами будет тем меньше, чем меньше разница между отношениями водяных эквивалентов, а также, чем ниже температура газа на входе в сектора. Кроме того, анализ выражений (3) и (4) показывает, что  $\Delta t_n = 0$  только в том случае, если одновременно выполняются условия  $V_{ш}^1 = V_{ш}^2$  и  $V_r^1 = V_r^2$ . Если же выполняется только условие  $V_{ш}^1 = V_{ш}^2$ , то выражение (4) принимает вид:

$$\Delta t_n = t_r^{BX} \frac{C_{ш}}{C_r} V_{ш} \left( \frac{V_r^2 - V_r^1}{V_r^1 \cdot V_r^2} \right). \quad (5)$$

Из выражения (5) видно, что при идеальном равномерном распределении материалов по окружности исследуемой зоны и постоянстве других величин значение  $\Delta t_n$  будет зависеть от разницы в количестве газов, проходящих через отдельные секторы. Такая разница может иметь место при неравномерном распределении газов по окружности нижней части печи по причине, например, неравномерного распределения дутья по фурмам.

В случае идеального распределения газов по окружности печи ( $V_r^1 = V_r^2$ ) выражение (3) принимает вид:

$$\Delta t_n = t_r^{вх} \frac{C_{ш}}{C_r} \left( \frac{V_{ш}^1 - V_{ш}^2}{V_r} \right). \quad (6)$$

Перепад температур  $\Delta t_n$  в данном случае будет зависеть в значительной степени от окружной неравномерности распределения материалов. Кроме того, данное выражение позволяет объяснить различные результаты исследования окружного распределения шихты и газов в работах [3–6]. При неизменных распределении шихты по окружности периферийной зоны и температуре газа на входе в нее  $\Delta t_n$  снижается с ростом количества газов, проходящих через секторы. Иначе говоря, чем выше степень развития периферийного потока газов, тем меньше должна быть величина  $\Delta t_n$  (вариант работы [3, 4]). Однако этот результат можно получить только в том случае, если при изменении расхода газов через зону не будет существенно изменяться температура газа на входе в эту зону. Такой вариант возможен при работе доменных печей с невысокой рудной нагрузкой в пристенной зоне и сильно развитым периферийным потоком газа ( $t_n \geq 600-800^\circ\text{C}$ ). Если же увеличение количества газов, проходящих через зону, сопровождается существенным увеличением температуры газов на входе в зону, то величина  $\Delta t_n$  будет возрастать.

С учетом приведенных закономерностей полученный на ДП-9 характер взаимосвязи радиального и окружного распределения шихты может быть представлен следующим образом. Температура газов на периферии верха шахты определяется количеством рудных материалов в этой части сечения и общим выходом газов в горне печи. При величинах рудных нагрузок более 3,5–4,0 т/т в этой зоне резко сокращается количество газов, и температура периферийных газов снижается до величины менее  $250^\circ\text{C}$ . Происходит снижение температур периферии на всех горизонтах шахты, что приводит к уменьшению эффективности тепло- и массообмена в периферийной зоне. Этим и объясняется отсутствие связи между температурой периферии и содержанием  $\text{CO}_2$  в периферийном газе.

Распределение газов по окружности в значительной степени определяется равномерностью окружного распределения шихты и характером распределения газов в нижней части доменной печи.

Применение бесконусного аппарата лоткового типа позволяет существенно снизить (в 3–5 раз), по сравнению с конусным загрузочным устройством, окружную неравномерность распределения шихты. В этом случае неравномерность распределения шихты по окружности не зависит от угла наклона лотка, а определяется равномерностью выдачи материалов шихтовым затвором, скоростью вращения лотка, характером падения шихты на лоток, особенностями работы лотка в процессе загрузки и др. [8]. Оптимизация указанных параметров позволяет снизить неравномерность распределения материалов по окружности печи до 4%.

Распределение газов по окружности нижней части доменной печи в значительной степени определяется распределением дутья по фурмам. В связи с отсутствием системы регулирования расход комбинированного дутья на каждую фурму на ДП-9 может отличаться до 50% и более. По этой причине на выходе из фурменных очагов имеет место значительная неравномерность в распределении газов по окружности печи. Как отмечается в работе [9], при движении газа к колошнику эта неравномерность несколько снижается, однако полностью не устраняется. Причем, чем выше сопротивление периферийной зоны при высокой рудной нагрузке и более равномерном распреде-



лении материалов по окружности, тем меньше степень развития периферийного потока газов и слабее влияние исходной (в горне) неравномерности распределения газов по окружности печи на  $\Delta t_n$ . Сокращение расхода газов в этой зоне приводит, как отмечалось выше, к значительному снижению температур по периферии шахты, увеличению отношения водяных эквивалентов и замедлению теплообмена, в результате чего  $\Delta t_n$  снижается до величины, при которой разница температур уже не соответствует действительному окружному распределению шихты и газов. При снижении рудных нагрузок на периферии усиливается газовый поток, в результате чего повышаются температуры по высоте шахты, уменьшается отношение водяных эквивалентов шихты и газов, усиливается теплообмен между шихтовыми материалами и газом. В этих условиях  $\Delta t_n$  начинает возрастать, и тем больше, чем выше степень развития периферийного потока газов. Это объясняется все более возрастающим влиянием на  $\Delta t_n$  неравномерности распределения газов по окружности, которая формируется в нижней части печи.

Приведенный механизм формирования взаимосвязи радиального и окружного распределения шихты и газов свидетельствует о том, что в конкретных условиях работы доменной печи имеет место определенная неравномерность окружного распределения газового потока, которая определяет оптимальную ширину интервала температур периферийного газа и обеспечивает высокую эффективность работы доменной печи. Так, максимальная удельная производительность доменной печи № 9 в период исследования достигалась при  $\Delta t_n = 160^\circ\text{C}$ . При этом величина средней температуры периферийных газов была более  $260^\circ\text{C}$ , что выше ее минимальной величины ( $170^\circ\text{C}$ ). Отклонение величины  $\Delta t_n$  от максимума в различные стороны сопровождается снижением производительности печи, что обусловлено, с одной стороны, ухудшением работы доменной печи при чрезмерной загрузке периферийной зоны рудными материалами и нарушением в ней процессов тепло- и массообмена, а, с другой, — чрезмерным усилением периферийного потока газов и снижением степени использования тепловой и химической энергии этих газов.

Результаты исследований показывают, что изменение радиального распределения материалов, приводящее к усилению потока газов на периферии, допустимо и оправдано, если оно не ухудшает окружного распределения газов. При загруженной периферии ( $\text{PH} > 3,5$  т/т, содержание  $\text{CO}_2$  в газе  $> 20\%$  и  $\bar{t}_n < 300^\circ\text{C}$ ) повышение газодинамической напряженности в этой зоне возможно, если величина  $\Delta t_n$  не выше оптимальной. Если  $\Delta t_n$  больше оптимальной величины, то целесообразно изменять характер радиального распределения материалов в сторону снижения интенсивности периферийного потока газов.

Таким образом, выполненный анализ позволил определить рациональные параметры окружного распределения шихты и газов для исследуемой доменной печи. Рациональное значение рудной нагрузки в периферийной зоне должно быть на уровне средней общей по печи величины рудной нагрузки. Неравномерность распределения рудных нагрузок в секторах по окружности колошника должна быть не более 4%. Температура газов на периферии должна быть не ниже  $260\text{--}300^\circ\text{C}$ , а разница между максимальной и минимальной температурами периферийных газов должна находиться в пределах  $150\text{--}170^\circ\text{C}$ .

#### Список литературы

1. Тарасов В.П. Газодинамика доменного процесса. — М.: Metallurgy, 1990. — 216 с.
2. Большаков В.И. Уменьшение неравномерности окружного распределения шихты — средство экономии кокса // Экономия кокса в доменных печах. — М.: Metallurgy, 1986. — С. 53–58.

3. Потехия Ю.М., Аносов В.Г., Михайленко О.А. О взаимосвязи радиального и окружного распределения газа в доменной печи. // Проблемы автоматизированного управления доменным производством. — М.: ЦНИИТЭИ приборостроения, 1979. — С. 10–11.

4. О влиянии интенсивности периферийного потока газов на окружное газораспределение в доменной печи / Г.Ю. Крячко, О.А. Бабенко, В.К. Гура, В.В. Косенко // *Металлургия и коксохимия*. — Киев: Техніка, 1984. — Вып. 84. — С. 30–32.

5. Донсков Е.Г., Боклан Б.В., Фомин Л.Д. Исследование взаимосвязи распределения газов по радиусу и окружности доменных печей // Проблемы автоматизированного управления доменным производством. — М.: ЦНИИТЭИ приборостроения, 1983. — С. 10–11.

6. Об использовании информации о температуре периферийных газов для управления ВРШ / Похвиснев А.Н., Рылов И.А., Рожавский Л.И. и др. // Проблемы управления доменным производством. — М.: ЦНИИТЭИ приборостроения, 1979. — С. 7–8.

7. *Теплотехника* доменного процесса / Китаев Б.И., Ярошенко Ю.Г., Суханов Е.Л. и др. — М.: *Металлургия*, 1978. — 248 с.

8. Бочка В.В. Исследование распределения шихтовых материалов в модели бесконусного засыпного аппарата. Сообщение 2 // *Изв. вузов. Черная металлургия*, 1980. — № 6. — С. 17–20.

9. Заболотских В.А., Паршаков В.М., Кабанов Г.К. Исследование влияния распределения материалов на движение газового потока в доменной печи // *Труды Всесоюзной конференции «Газодинамика и механика движения материалов в шахтных печах»*. — Свердловск: ВНИИ ЧМ, 1986. — С. 19–20.

© Бочка В.В., Тараканов А.К., Зубрицкий А.П., 2002

**ИВАНОВ А.И.** (ДонНТУ), **МАХОВ Г.Г.** (ГОРМЗГ), **БЕЗБОРОДОВ Д.Л.**,  
**КОНСТАНТИНОВ Г.Е.** (ДонНТУ)

## К ВОПРОСУ О ТЕРМОДИНАМИКЕ РЕАКЦИИ ВОДЯНОГО ГАЗА

При расчете технологии газификации угля решающее значение имеет реакция водяного газа  $CO + H_2O = CO_2 + H_2$ . При этом обычно принимается значение константы равновесия  $K_p$  равной 2–3 и затем методом последовательного приближения выбирается оптимальное ее значение. В данной работе сделан термодинамический анализ этой реакции и показано, что возможна только такая схема:  $CO_2 + H_2 = CO + H_2O$ , а

отсюда константа равновесия  $K_p = \frac{P_{CO} \cdot P_{H_2O}}{P_{CO_2} \cdot P_{H_2}}$  и для ее расчета дается уравнение

$\lg K_p = -\frac{2150}{T} + 2,25$ . Поэтому методика определения химического состава генераторного газа упрощается и легко выполняется с помощью компьютера.

Проведем термодинамический анализ этой реакции:



Константа равновесия данной реакции выражается уравнением:

$$k_p = \frac{P_{CO_2} \cdot P_{H_2}}{P_{CO} \cdot P_{H_2O}} = \frac{(\%CO_2)_p \cdot (\%H_2)_p}{(\%CO)_p \cdot (\%H_2O)_p}, \quad (2)$$

где  $(\%CO_2)_p$ ,  $(\%H_2)_p$ ,  $(\%CO)_p$ ,  $(\%H_2O)_p$  — содержание отдельных газов в равновесной газовой фазе в объемных процентах.

Реакция идет без изменения объема, поэтому численные значения константы равновесия не зависят от того, выражена ли она в парциальных давлениях, или в объемных процентах.