



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-1-106-113>
УДК 669

Поступила 19.02.2021
Received 19.02.2021

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕРАБОТКИ ПЫЛИ ГАЗООЧИСТКИ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПРОИЗВОДСТВ

С. Л. РИМОШЕВСКИЙ, Д. А. ПРОКОПЧУК, Д. М. ГОЛУБ, ОАО «БЕЛНИИЛИТ» г. Минск, Беларусь,
ул. Машиностроителей, 28. E-mail: belniilit@belniilit.by

В статье рассматриваются вопросы переработки пыли электросталеплавильного производства методом термодинамического извлечения железа, цинка и свинца с целью снижения воздействия на окружающую среду и увеличения ресурсной базы отрасли. Представлены различные методы извлечения цинка из пылегазоочистки, термодинамический расчет разложения и восстановления феррита цинка.

Ключевые слова. Пылегазоочистка, электросталеплавильное производство, термодинамическое извлечение, оксид цинка, энергия Гиббса, свинец, железо.

Для цитирования. Римошевский, С.Л. Исследование процессов переработки пыли газоочистки сталеплавильных производств / С.Л. Римошевский, Д.А. Прокопчук, Д.М. Голуб // *Литье и металлургия*. 2021. № 1. С. 106–113. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-1-106-113>.

INVESTIGATION OF THE PROCESSES OF DUST PROCESSING GAS CLEANING OF STEELMAKING INDUSTRIES

S. L. RIMOSHEVSKY, D. A. PROKOPCHUK, D. M. GOLUB, OJSC “BELNIILIT” Minsk, Belarus, 28,
Mashinostroiteley str. E-mail: belniilit@belniilit.by

The article deals with the issues of processing of dust from electric steelmaking production by the method of thermodynamic extraction of iron, zinc and lead in order to reduce the environmental impact and increase the resource base of the industry. The paper presents various methods of zinc extraction from dust and gas purification, thermodynamic calculation of the decomposition and reclaiming of zinc ferrite.

Keywords. Dust and gas cleaning, electric steelmaking, thermodynamic extraction, zinc oxide, Gibbs energy, lead, iron.

For citation. Rimoshevsky S. L., Prokopchuk D. A., Golub D. M. Investigation of the processes of dust processing gas cleaning of steelmaking industries. *Foundry production and metallurgy*, 2021, no. 1, pp. 106–113. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-1-106-113>.

Отходы металлургического производства являются наиболее интенсивными источниками загрязнения экологии. На полигоны твердых отходов складывается большое количество техногенных вторичных ресурсов в виде шлака и пыли газоочисток.

В условиях ОАО «БМЗ» системами пылегазоочистки ежегодно улавливается около 35 тыс.т пыли электросталеплавильного производства при коэффициенте очистки газа 99%. Состав улавливаемой пыли за последние 20–30 лет изменился кардинально, поскольку изменилась структура шихты. Если в период пуска и освоения БМЗ основной состав пыли составляли оксиды железа с небольшим содержанием цветных примесей, то сейчас доля свинца, олова, цинка в пыли выросла в десятки раз. Например, 20 лет назад в составе пыли цинка содержалось около 0,3%, сейчас – от 15 до 30%. Это объясняется тем, что на смену крупногабаритному углеродистому лому в плавильную печь теперь попадает значительная доля лома с покрытиями. В этих условиях необходимо найти пути снижения пылеобразования и использования пыли в качестве вторичного сырья с целью извлечения ценных компонентов, в первую очередь Fe, Zn, Pb.

Появление и развитие новых технологий позволило сделать извлечение ценных элементов из шлака, пыли и шламов рентабельным, что повысило интерес к использованию вторичных ресурсов, в том числе для производства новой продукции. Особое внимание уделяется разработке способов извлечения ценных компонентов из металлургической пыли, например, цинка и свинца.

Изучение вопросов образования пыли в дуговой печи, свойств этой пыли и возможностей ее утилизации представляет несомненный интерес с точки зрения снижения воздействия на окружающую среду и увеличения ресурсной базы отрасли. С этой целью были проведены исследования, задачами которых являлись изучение состава, структуры и свойств электросталеплавильной пыли; термодинамическое моделирование процессов извлечения железа, цинка и свинца из пыли; поиск путей переработки пыли и эффективного использования в народном хозяйстве.

При разработке технологии и организации производства по извлечению полезных элементов из образующейся пыли необходимо выполнить теоретическое исследование для понимания процесса образования пыли и прогнозирования ее состава в зависимости от загружаемой в электродуговую печь шихты. При интенсивной работе дуги в период расплавления лома и доводки расплава до заданного химического состава происходят интенсивные экзотермические процессы окисления расплава.

Механизм испарения компонентов расплава включает следующие стадии: внутреннюю диффузию и испарения.

При электроплавке диффузионные процессы, как правило, не являются лимитирующими, поскольку за счет интенсификации процесса плавки происходят интенсивное перемешивание ванны и отвод образующихся газов и пыли. Интенсивность испарения компонентов расплава в ДСП зависит от температуры поверхности расплава и давления насыщенного пара испаряющегося вещества. Скорость испарения вещества можно определить из уравнения Ленгмюра, которое используется для расчета интенсивности испарения в вакууме, кг/с:

$$\omega = \alpha \cdot p^0 \sqrt{\frac{A}{2\pi RT}}, \quad (1)$$

где α – коэффициент Ленгмюра;

p^0 – давление насыщенного пара элемента, Па;

A – атомная масса элемента, кг;

R – универсальная газовая постоянная, 8,314 Дж/(Кмоль);

T – температура, К.

Скорость испарения определяется по массе m , которую теряет вещество, нагретое до температуры T за время τ с поверхности S при испарении в вакууме.

Коэффициент испарения α учитывает возможные препятствия для испарения с поверхности. Его можно определить экспериментально по уравнению Ленгмюра, если все остальные величины известны. Для чистых веществ это не представляет сложности, но для многокомпонентных расплавов необходимо знать коэффициенты активности веществ. При условиях, отличных от вакуума, необходимо использовать коэффициент a .

Электрические параметры плавки в ДСП оказывают большое влияние на интенсивность пылеобразования.

В зоне воздействия дуг, кроме температурного фактора, имеют значения формирования анодного пятна, электро- и газодинамических сил, плотности тока.

Цинк в пыли электросталеплавильного производства в основном (70–85 %) представлен ZnO, остальные 15–30 % приходятся на $ZnFe_2O_4$; $3(Cu, Zn)SO_4 \cdot 4H_2O$; $Zn_3(AsO_4)_2 \cdot 4H_2O$; $ZnS_2O_4 \cdot Na_2S_2O_4 \cdot n \cdot H_2O$; $3(Zn, Mg)O \cdot 4(Si, Al)O_2 \cdot H_2O$; $Cd_3Zn(SO_3)_4$ и $Zn_{12}(SO_4)Cl_3(OH)_{15} \cdot 5H_2O$.

Авторы работы [1] отмечают присутствие фаз в пыли ЭСПЦ ЧерМК, приведенных в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Фазовый состав пыли ЭСПЦ ЧерМК

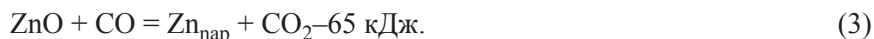
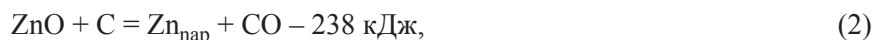
Наименование фаз	Содержание, %
Магнетит (Fe_3O_4)	50,0
Цинкит (ZnO)	18,7
Лаурионит ($PiCl(OH)$)	1,7
Оксид кремния (SiO_2)	13,2
Энстатит ($(Mg, Fe)Si_2O_6$)	16,0

По дисперсности пыль классифицируется на следующие группы: видимая пыль (размер более 10 мкм); микроскопическая пыль (размер от 0,25 до 10 мкм); ультрамикроскопическая пыль (размер менее 0,25 мкм).

Выделение цинка осуществляется пирометаллургическим или гидromеталлургическим способом. Пирометаллургическим способом получают около 15 % цинка. Дистилляция (испарение металла при

температурах выше точки их кипения) цинка включает следующие физико-химические процессы: восстановление оксида цинка до металла углеродом и CO при 1000–1100 °С; испарение (возгонка, дистилляция) металлического цинка; конденсацию паров металлического цинка.

Процесс восстановления цинка проходит в результате протекания реакций:



Восстановительная атмосфера поддерживается восстановлением диоксида углерода.

Оксид цинка частично восстанавливается за счет твердого углерода, но главным восстановителем является оксид углерода, в то время как углерод взаимодействует с CO₂, что ускоряет восстановление оксида цинка. Получение жидкого цинка дистилляцией возможно только в условиях сильно восстановительной атмосферы и полной герметизации применяемой аппаратуры.

Оксид цинка может восстанавливаться железом:



Реакция протекает в 2 раза быстрее по отношению к оксиду углерода. При производстве цинка железо считается вредной примесью, так как оно образует чугун, легкоплавкие шлаки и при наличии серы – штейны:



Цинк в момент восстановления находится в парообразном состоянии. При дистилляционном процессе пары цинка всегда разбавлены другими газами, главным образом, оксидом углерода. Каждый газ в отдельности в зависимости от его объема будет иметь свое парциальное давление, поэтому, чем больше будут разбавлены цинковые пары другими газами, тем меньше будет парциальное давление цинка и тем ниже точка росы.

Например, при производстве цинка парциальное давление паров в ретортных газах составляет около 50 кПа (300–370 мм рт. ст.), а точка росы соответствует температуре 830–870 °С.

Таким образом, для восстановления цинка из его оксида нужны следующие условия: высокая температура; атмосфера, состоящая почти полностью из CO (появление в атмосфере небольших количеств CO₂ смещает реакцию восстановления оксида цинка влево); восстановительная атмосфера и полная герметизация печи для обеспечения конденсации паров цинка (так как в присутствии CO₂ образовавшийся цинк вновь окисляется (сгорает)).

Восстановление оксида железа способствует полноте возгонки цинка:



В газоотводе пары металлов вновь окисляются кислородом воздуха или углекислым газом:



Повышение температуры от 900 до 1100 °С интенсифицирует отгонку цинка в 2 раза, а повышение концентрации CO от 75 до 85% – в 4–5 раз.

Анализ селективного извлечения цинка и свинца

Определить температуру перехода чистых компонентов железа, цинка в пар можно по температурной зависимости их давления насыщенного пара. В работе [2] приведено уравнение для цинка в температурном интервале 936–980 °С:

$$\ln p_{\text{Zn}} = 12,046 - \frac{6655}{T} - 1,147 \lg T. \quad (10)$$

Т а б л и ц а 2. Давление пара жидкого цинка

<i>T</i> , °С	490,8	544,6	588,9	641,2	720,5	836,0
<i>p</i> , кПа	0,14	0,49	1,21	3,07	10,86	47,49

При более низких температурах можно использовать значения, приведенные в табл. 2, а при более высоких температурах – в табл. 3, предварительно переводя из мм рт. ст. в кПа.

Таблица 3. Давление насыщенного пара жидкого свинца

$T, ^\circ\text{C}$	$p, \text{кПа}$	$T, ^\circ\text{C}$	$p, \text{кПа}$	$T, ^\circ\text{C}$	$p, \text{кПа}$	$T, ^\circ\text{C}$	$p, \text{кПа}$
1159,9	1,2	1196,5	1,7	1214,9	2,1	1222,5	2,3
1167	1,3	1202,6	1,7	1216,1	2,1	1224,9	2,5
1175	1,4	1203,7	1,9	1203,7	2,2	1231,2	6,0
1180,8	1,5	1207,2	1,9	1217,4	2,2	1324	2,3
1189,2	1,6	1212,8	2,1	1218,8	2,2		
1193,7	1,7	1213,8	2,1	1219	2,3		

Температура, при которой давление насыщенного пара элемента достигает 101,325 кПа, является температурой кипения вещества. При этой температуре вещество полностью превращается в пар. Цинк переходит в пар при температуре около 906 °С.

Так как в металлургической пыли цинк находится в виде оксидов, то представляет интерес давление насыщенного пара их оксидов.

Извлечение цинка из чистого ZnO проходит при высоких температурах (около 2200 К) по результатам термодинамических расчетов. При добавлении восстановителя температуру извлечения цинка из ZnO можно уменьшить. Это свойство используется в цветной металлургии для извлечения цинка.

Термодинамический расчет разложения и восстановления феррита цинка

Основная сложность утилизации пыли электросталеплавильного производства заключается в содержании в ее составе термически устойчивого соединения – феррита цинка (ZnFe_2O_4). Его доля в цинксодержащих компонентах пыли может достигать 30%.

Анализ процессов разложения и фазовых переходов для феррита цинка по литературным источникам показал различающиеся данные.

Переход из твердого состояния в жидкое без разложения происходит при температуре 1590 ± 10 °С.

В работе [3] приведена реакция разложения феррита цинка:



для которой в температурном диапазоне 25–700 °С изменение энтальпии равно 2300 кал/моль, а изменение энтропии – 0,9 кал/моль.

Сделано допущение, что в температурном диапазоне до 3000 °С энтальпия и энтропия реакции остаются неизменными. Константу равновесия реакции можно определить из выражения:

$$\Delta G = 9623,2 - 3,77 \cdot T, \text{ Дж/моль} \quad (12)$$

$$\ln K = -\Delta G/RT = -(9623,2 - 3,77T) / (R \cdot T). \quad (13)$$

Константа равновесия во всем температурном интервале до 2555 К имеет отрицательный знак. Это свидетельствует о том, что реакция существенно сдвинута влево, т. е. разложение феррита цинка невозможно. Моделирование процесса нагрева феррита цинка (рис. 1) показало, что уже примерно при температуре 1250 °С он полностью разлагается.

Установлено, что при температурах 298–2000 К данная фаза находится в стабильном состоянии.

Анализ показал, что в температурном диапазоне 3050–3100 К феррит цинка разлагается по реакции:



причем ZnO находится в жидком состоянии. При этом сразу происходит его разложение по реакции:



В работе [4] авторы приводят графические данные по расчету энергии Гиббса реакций разложения и восстановления феррита цинка наиболее распространенными восстановителями (углерод, монооксид углерода, водород, метан) (рис. 2).

Из рисунка видно, что частично восстанавливается оксид цинка, однако заметное его количество образуется при температуре свыше 1000 °С и сразу в газообразном виде. Из-за недостатка углерода железо и марганец восстанавливаются в незначительной степени, восстановления MgO, SiO₂ и CaO не

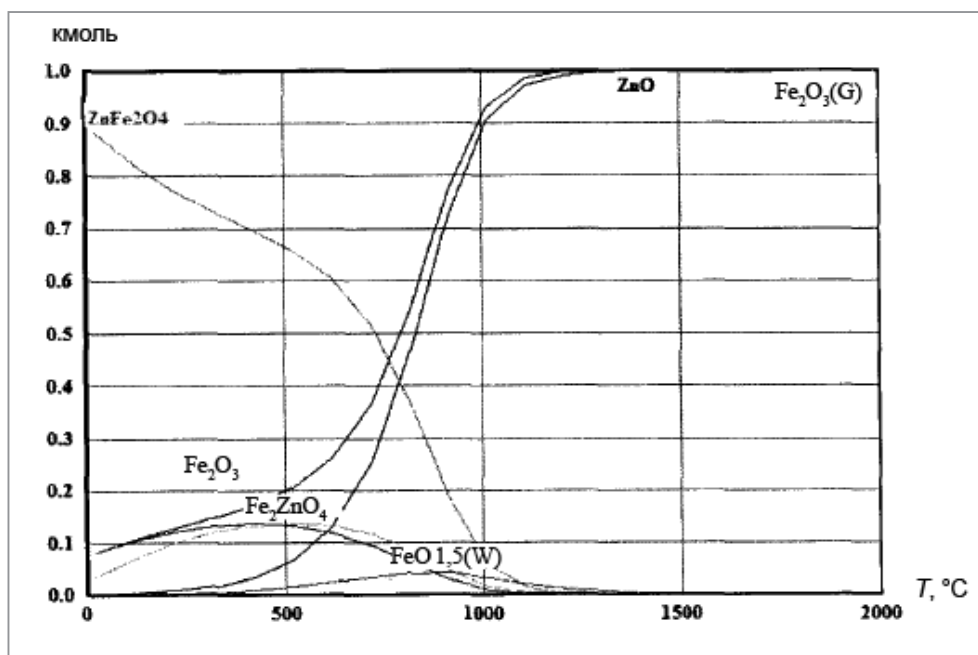
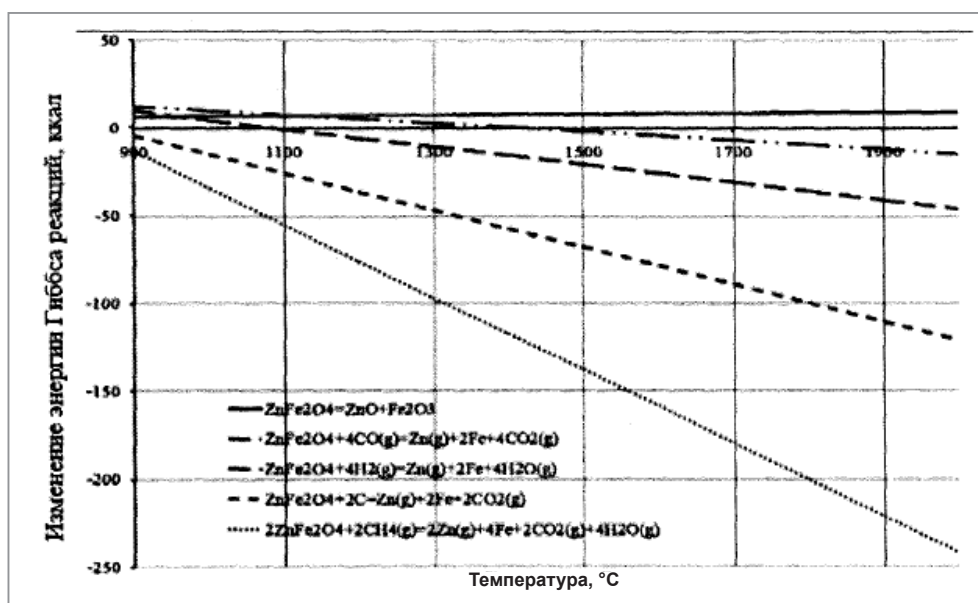


Рис. 1. Моделирование разложения феррита цинка

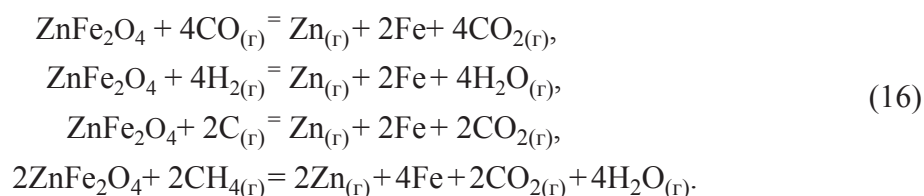
Рис. 2. Температурная зависимость ΔG реакций разложения и восстановления феррита цинка

происходит вовсе. Термодинамически устойчивым является феррит цинка $ZnFe_2O_4$ (цинкит железа), что осложняет процесс восстановления обоих элементов.

Энергия Гиббса реакции разложения $ZnFe_2O_4$ имеет положительный знак, что также свидетельствует о невозможности разложения в указанном температурном интервале.

Разложение $ZnFe_2O_4$ и его восстановление возможны при высоких температурах. Анализируя приведенные литературные данные, можно сделать вывод о том, что для разложения $ZnFe_2O_4$ необходимы высокие температуры либо восстановители.

Энергию Гиббса определяли для следующих реакций, кДж/моль:



Для реакции 1:

$$\begin{aligned} \Delta G^\circ &= \Delta G^\circ_{\text{ZnO}} + \Delta G^\circ_{\text{ZnFe}_2\text{O}_4} - \Delta G^\circ_{\text{ZnFe}_2\text{O}_4}, \\ \Delta G^\circ_{\text{ZnO}} &= \Delta H^\circ_{\text{ZnO}} + T\Delta S^\circ_{\text{ZnO}} = -350,6 + 43,64 T, \\ \Delta G^\circ_{\text{Fe}_2\text{O}_3} &= \Delta H^\circ_{\text{Fe}_2\text{O}_3} + T\Delta S^\circ_{\text{Fe}_2\text{O}_3} = -822,2 + 87,4 T, \\ \Delta G^\circ_{\text{ZnFe}_2\text{O}_4} &= \Delta H^\circ_{\text{ZnFe}_2\text{O}_4} + T\Delta S^\circ_{\text{ZnFe}_2\text{O}_4} = -1181,98 + 153,301 T, \\ \Delta G^\circ &= -350,6 - 43,64 T - 822,2 - 87,4 T + 1181,98 + 153,30 T = 9197 + 22,21 T, \\ \Delta G^\circ &= 9197 + 22,21 T \end{aligned} \tag{17}$$

Для реакции 2:

$$\begin{aligned} \Delta G^\circ &= \Delta G^\circ_{\text{Zn(r)}} + 2\Delta G^\circ_{\text{Fe}} + 4\Delta G^\circ_{\text{CO}_2(\text{r})} - \Delta G^\circ_{\text{ZnFe}_2\text{O}_4} - 4\Delta G^\circ_{\text{Co(r)}}, \\ \Delta G^\circ_{\text{Zn(r)}} &= 0 - 41,63 T, \\ \Delta G^\circ_{\text{Fe}} &= 0 - 27,15 T, \\ \Delta G^\circ_{\text{CO}_2(\text{r})} &= -393,51 - 213,68 T, \\ \Delta G^\circ_{\text{Co(r)}} &= -110,52 - 197,547 T. \end{aligned} \tag{18}$$

Расчет энергии Гиббса приведен в табл. 4 с учетом реакции 2.

Т а б л и ц а 4. Расчет энергии Гиббса для реакции 2

ΔG	ΔH , Дж/моль	ΔS , кДж/(моль·К)
$\Delta G^\circ_{\text{Zn(r)}}$	0	-41,63
$2\Delta G^\circ_{\text{Fe}}$	0	-54,3
$4\Delta G^\circ_{\text{H}_2\text{O(r)}}$	-1143320	-754,88
$-\Delta G^\circ_{\text{ZnFe}_2\text{O}_4}$	1181980	153,301
$-4\Delta G^\circ_{\text{H}_2(\text{r})}$	0	522,08
ΔG°	38660	-175,43T

Полученные значения энергии Гиббса для реакции 2:

$$\Delta G^\circ = 50020 - 7,189 T. \tag{19}$$

Для реакции 3:

$$\begin{aligned} \Delta G^\circ &= \Delta G^\circ_{\text{Zn(r)}} + 2\Delta G^\circ_{\text{Fe}} + 4\Delta G^\circ_{\text{H}_2\text{O(r)}} - \Delta G^\circ_{\text{ZnFe}_2\text{O}_4} - 4\Delta G^\circ_{\text{H}_2(\text{r})}, \\ \Delta G^\circ_{\text{H}_2\text{O(r)}} &= -285,83 - 188,72 T, \\ \Delta G^\circ_{\text{ZnFe}_2\text{O}_4} &= -1181,98 - 153,301 T, \\ \Delta G^\circ_{\text{H}_2(\text{r})} &= 0 - 130,52 T. \end{aligned} \tag{20}$$

Расчет энергии Гиббса приведен в табл. 5 с учетом реакции 3.

Т а б л и ц а 5. Расчет энергии Гиббса для реакции 3

ΔG	ΔH , Дж/моль	ΔS , кДж/(моль·К)
$\Delta G^\circ_{\text{Zn(r)}}$	0	-41,63
$2\Delta G^\circ_{\text{Fe}}$	0	-54,3
$4\Delta G^\circ_{\text{H}_2\text{O(r)}}$	-1143320	-754,88
$-\Delta G^\circ_{\text{ZnFe}_2\text{O}_4}$	1181980	153,301
$-4\Delta G^\circ_{\text{H}_2(\text{r})}$	0	522,08
ΔG°	38660	-175,43T

Полученные значения энергии Гиббса для реакции 3:

$$\Delta G^\circ = 38660 - 175,43 T. \tag{21}$$

Для реакции 4:

$$\Delta G^{\circ} = \Delta G^{\circ}_{\text{Zn}} + 2\Delta G^{\circ}_{\text{Fe}} + 4\Delta G^{\circ}_{\text{CO}_2(\text{r})} - \Delta G^{\circ}_{\text{ZnFe}_2\text{O}_4} - 4\Delta G^{\circ}_{\text{C}(\text{r})}, \quad (22)$$

$$\Delta G^{\circ}_{\text{C}} = 0 - 5,740 T.$$

Расчет энергии Гиббса приведен в табл. 6 с учетом реакции 4.

Т а б л и ц а 6. Расчет энергии Гиббса для реакции 4

ΔG	ΔH , Дж/моль	ΔS , кДж/(моль·К)
$\Delta G^{\circ}_{\text{Zn}}$	0	-83,26
$2\Delta G^{\circ}_{\text{Fe}}$	0	-108,6
$4\Delta G^{\circ}_{\text{CO}_2(\text{r})}$	-787020	-427,36
$-\Delta G^{\circ}_{\text{ZnFe}_2\text{O}_4}$	-1143320	-754,88
$-4\Delta G^{\circ}_{\text{CO}(\text{r})}$	2363960	306,6
ΔG°	583320	-695,12

Полученные значения энергии Гиббса для реакции 4:

$$\Delta G^{\circ} = 394960 - 358,51 T. \quad (23)$$

Для реакции 5:

$$\Delta G^{\circ} = 2\Delta G^{\circ}_{\text{Zn}} + 4\Delta G^{\circ}_{\text{Fe}} + 2\Delta G^{\circ}_{\text{CO}_2(\text{r})} + 4\Delta G^{\circ}_{\text{H}_2\text{O}(\text{r})} - 2\Delta G^{\circ}_{\text{ZnFe}_2\text{O}_4} - 2\Delta G^{\circ}_{\text{CH}_4(\text{r})}, \quad (24)$$

$$\Delta G^{\circ}_{\text{CH}_4} = -74,85 - 186,19 T.$$

Расчет энергии Гиббса приведен в табл. 7 с учетом реакции 5.

Т а б л и ц а 7. Расчет энергии Гиббса для реакции (5)

ΔG	ΔH , Дж/моль	ΔS , кДж/(моль·К)
$\Delta G^{\circ}_{\text{Zn}}$	0	-83,26
$2\Delta G^{\circ}_{\text{Fe}}$	0	-108,6
$4\Delta G^{\circ}_{\text{CO}_2(\text{r})}$	-787020	-427,36
$-\Delta G^{\circ}_{\text{ZnFe}_2\text{O}_4}$	-1143320	-754,88
$-4\Delta G^{\circ}_{\text{CO}(\text{r})}$	2363960	306,6
ΔG°	583320	-695,12

Полученные значения энергии Гиббса для реакции 5:

$$\Delta G^{\circ} = 583,32 - 695,12 T. \quad (25)$$

Выводы

Теоретически установлено, что пары цинка, свинца и железа образуются не одновременно, а с временным интервалом, что позволяет селективно извлекать цветные металлы из пыли в зависимости от содержания в ней углерода.

При низком содержании углерода (менее 3%) первым в процессе нагрева материала извлекается свинец, затем цинк. При увеличении продолжительности процесса извлечения цветных металлов из пыли содержание углерода не имеет значения. При увеличении содержания углерода цинк и свинец извлекаются одновременно.

Установлено, что для извлечения феррита цинка необходимы высокотемпературные процессы, но с использованием восстановителей возможен процесс при более низких температурах.

Результаты экспериментов по извлечению цинка и свинца из пыли электросталеплавильного производства показали, что при ее обработке высокотемпературным способом степень извлечения цинка достигает до 97 и 99% соответственно (при отсутствии значительных потерь Fe).

Получено, что образующийся конденсат состоит в основном из ZnO, а спек – в основном из оксидов Fe.

Показана перспективная возможность селективного извлечения цинка с низким содержанием углерода.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Корнеев, В. П.** Исследование физико-химических свойств цинксодержащих пылей электросталеплавильного производства / В. П. Корнеев, В. П. Сиротинкин, Н. В. Петракова, В. Г. Дюбанов, Л. И. Леонтьев // *Металлы*. 2013. № 4. С. 38–43.
2. **Несмеянов, А. Н.** Давление пара химических элементов / А. Н. Несмеянов. М.: Изд-во АН СССР, 1961. 396 с.
3. **Туркдоган, Е. Т.** Физическая химия высокотемпературных процессов / Е. Т. Туркдоган. М.: Metallurgija, 1985. 344 с.
4. **Могутнов, Б. М.** Термодинамика железоуглеродистых сплавов / Б. М. Могутнов, И. А. Томилин. М.: Metallurgija, 1972. 249 с.

REFERENCES

1. **Korneev V.P., Sirotinkin V.P., Petrakova N.V., Djubanov V.G., Leont'ev L.I.** Issledovanie fiziko-himicheskikh svojstv cink-soderzhashhih pylej jelektrostaleplavil'nogo proizvodstva [Investigation of the physicochemical properties of zinc-containing dusts of electric steel-making production]. *Metally = Metals*, 2013, no. 4, pp. 38–43.
2. **Nesmejanov A.N.** *Davlenie para himicheskikh jelementov* [Vapor pressure of chemical elements]. Moscow, Izdatel'stvo AN SSSR Publ., 1961. 396 p.
3. **Turkdogan E.T.** *Fizicheskaja himija vysokotemperaturnyh processov* [Physical chemistry of high-temperature processes]. Moscow, Metallurgija Publ., 1985. 344 p.
4. **Mogutnov B.M., Tomilin I.A.** *Termodinamika zhelezouglerodistykh splavov* [Thermodynamics of iron-carbon alloys]. Moscow, Metallurgija Publ., 1972. 249 p.