

УДК 669.2

А.И. Демидов, И.А. Маркелов

**ТЕРМОДИНАМИКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОКСИДОВ ЖЕЛЕЗА
С ГРАФИТОМ С УЧЕТОМ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТАВА ВЮСТИТА
ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ В ИНТЕРВАЛЕ 900–1600 К**

A.I. Demidov, I.A. Markelov

**THERMODYNAMICS OF INTERACTION OF IRON OXIDES WITH GRAPHITE
TAKING INTO ACCOUNT THE CHANGING OF WUSTITE COMPOSITION
WITH TEMPERATURE IN THE TEMPERATURE RANGE 900–1600 K**

Проведены расчеты изменения стандартной энергии Гиббса реакций взаимодействия оксидов железа с графитом с образованием оксида углерода II и оксида углерода IV с учетом изменения состава вюстита при изменении температуры в интервале 900–1600 К на 1 моль атомов исходных веществ. Дан сравнительный анализ результатов расчета и экспериментальных данных по кинетике изученных реакций.

ТЕРМОДИНАМИКА. ВОССТАНОВЛЕНИЕ. ОКСИДЫ ЖЕЛЕЗА. ВЮСТИТ. ГРАФИТ.

In this paper values for the standard Gibbs free energy of the reactions of interaction of iron oxides with graphite were calculated in the temperature range 900–1600 K per 1 mole of precursor atoms. The results were compared with experimental kinetic data.

THERMODYNAMICS. REDUCTION. IRON OXIDES. WUSTITE. GRAPHITE.

Термодинамика взаимодействия оксидов железа с графитом представляет значительный интерес для теоретического обоснования режимов восстановления железных руд, получения железа и чугуна [1–5].

В большинстве работ, касающихся вопроса взаимодействия оксидов железа с графитом, основное внимание уделено кинетике и механизму протекающих реакций. В то же время рассмотрение термодинамики указанных реакций ограничивается расчетом тепловых эффектов и изменения энергии Гиббса без учета изменения состава вюстита при изменении температуры. Поэтому термодинамические расчеты реакций взаимодействия оксидов железа и графита с учетом изменения состава вюстита в зависимости от температуры, в частности изменения энергии Гиббса, представляют определенный интерес.

В работе проведен термодинамический анализ реакций взаимодействия оксидов железа с графитом в интервале 900–1600 К с учетом изменения состава вюстита при изменении температуры. Результаты расчетов сопоставлены

с экспериментальными данными по кинетике изученных реакций.

Систему Fe–O–C можно представить в виде концентрационного треугольника (рис. 1). В таком случае термодинамический расчет реакций взаимодействия оксидов железа с графитом целесообразно проводить по сечениям треугольника, проведенным из угла графита на сторону Fe–O, на соответствующий состав оксида железа, при этом в каждом сечении соотношение кислорода к железу остается постоянным.

Составы системы, отвечающие реакциям (1)–(10), приведены в табл. 1. На рис. 1 составы вюстита, находящегося в равновесии с магнетитом ($\text{FeO}_{(1+x'')}$) или с железом ($\text{FeO}_{(1+x')}$), обозначены общим символом $\text{FeO}_{(1+x)}$. С увеличением температуры изменяется состав вюстита, находящегося в равновесии с магнетитом ($\text{FeO}_{(1+x'')}$) или с железом ($\text{FeO}_{(1+x')}$), поэтому положение составов системы, отвечающих реакциям (2), (3), (5), (6) и (8)–(10) на концентрационном треугольнике Fe–O–C, тоже меняется, но незначительно.

Таблица 1

Составы системы, отвечающие реакциям (1)–(10), на концентрационном треугольнике Fe–O–C

Элемент	Содержание, %, в зависимости от реакции									
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
<i>T</i> = 900 K										
O	56,25	51,33	50,92	37,50	51,50	51,04	36,36	51,29	34,15	33,91
Fe	37,50	34,22	33,95	25,00	38,63	38,28	27,28	47,59	31,70	32,18
C	6,25	14,45	15,13	37,50	9,87	10,68	36,36	1,12	34,15	33,91
<i>T</i> = 1000 K										
O	–	51,73	50,86	–	51,95	50,96	–	51,17	34,38	33,88
Fe	–	34,48	33,90	–	38,96	38,22	–	46,52	31,24	32,24
C	–	13,79	15,24	–	9,09	10,82	–	2,31	34,38	33,88
<i>T</i> = 1100 K										
O	–	52,02	50,83	–	52,28	50,93	–	51,12	34,53	33,86
Fe	–	34,68	33,88	–	39,21	38,20	–	45,79	30,94	32,28
C	–	13,30	15,29	–	8,51	10,87	–	3,09	34,53	33,86
<i>T</i> = 1200 K										
O	–	52,27	50,82	–	52,57	50,92	–	51,09	34,67	33,85
Fe	–	34,85	33,88	–	39,43	38,19	–	45,20	30,66	32,30
C	–	12,88	15,30	–	8,00	10,89	–	3,71	34,67	33,85
<i>T</i> = 1300 K										
O	–	52,50	50,82	–	52,84	50,92	–	51,08	34,79	33,85
Fe	–	35,00	33,88	–	39,63	38,19	–	44,68	30,42	32,30
C	–	12,50	15,30	–	7,53	10,89	–	4,24	34,79	33,85
<i>T</i> = 1400 K										
O	–	52,73	50,82	–	53,09	50,92	–	51,07	34,90	33,85
Fe	–	35,15	33,88	–	39,81	38,19	–	44,21	30,20	32,30
C	–	12,12	15,30	–	7,10	10,89	–	4,72	34,90	33,85
<i>T</i> = 1500 K										
O	–	52,97	50,83	–	53,37	50,94	–	51,08	35,01	33,86
Fe	–	35,31	33,89	–	40,02	38,20	–	43,72	29,98	32,28
C	–	11,72	15,28	–	6,61	10,86	–	5,20	35,01	33,86
<i>T</i> = 1600 K										
O	–	53,27	50,86	–	53,70	50,97	–	51,10	35,15	33,88
Fe	–	35,51	33,91	–	40,28	38,23	–	43,16	29,70	32,24
C	–	11,22	15,23	–	6,02	10,80	–	5,74	35,15	33,88

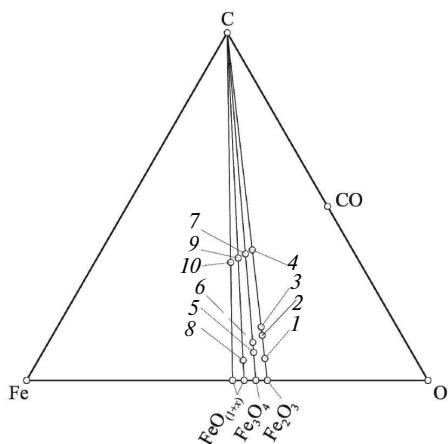
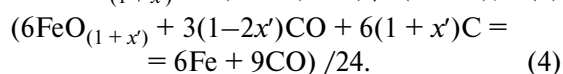
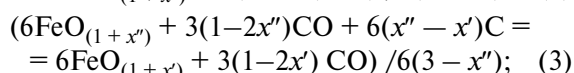
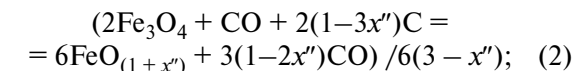
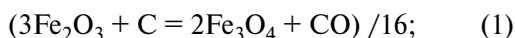


Рис. 1. Концентрационный треугольник Fe–O–C с координатами реакций (1)–(10)

Проводили расчет изменения стандартной энергии Гиббса G реакций на 1 моль атомов исходных веществ, как это было выполнено в работах [6, 7]. Исходные данные для расчетов взяты из справочника [8]. Значения функции G для вюститита, находящегося в равновесии с магнетитом ($\text{FeO}_{(1+x')}$) или с железом ($\text{FeO}_{(1+x'')}$), с учетом изменения состава вюститита при изменении температуры взяты из работы [9].

Газообразными продуктами реакций взаимодействия оксидов железа с графитом могут быть оксид углерода II и оксид углерода IV. В первом случае уравнения реакций восстановления оксида железа III графитом в расчете на 1 моль атомов исходных веществ могут быть записаны следующим образом:



В уравнении реакции (1) отношение кислорода к железу равно 1,500. Для сохранения в уравнениях реакций (2)–(4) такого же отношения кислорода к железу продукты реакций (1)–(3) приняты исходными веществами соответственно для реакций (2)–(4).

Результаты расчетов представлены в табл. 2. Как видно из нее, изменения стандартной энергии Гиббса реакций (1) и (2) в указанном интервале температур отрицательны, следовательно, равновесие реакций сдвинуто в сторону образования продуктов реакций. Изменения стандартной энергии Гиббса реакций (3) и (4) становятся отрицательными при температурах выше соответственно 1000 и 900 К, значит, равновесие реакций сдвигается в сторону образования продуктов реакций.

Уравнения реакций восстановления оксида железа III, II графитом, когда газообразным продуктом реакций является оксид углерода II, следующие:

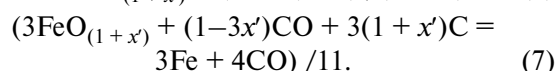
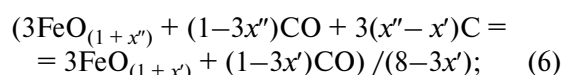
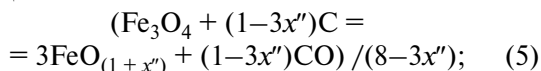


Таблица 2

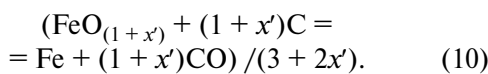
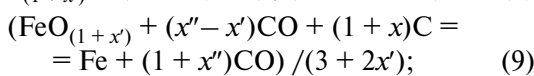
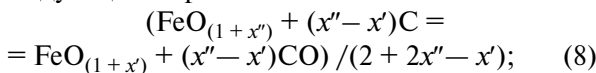
Изменения стандартной энергии Гиббса для реакций (1)–(4) в интервале температур 900–1600 К

T, К	1 + x'	1 + x''	ΔG , кДж/моль, в разных реакциях			
			(1)	(2)	(3)	(4)
900	1,0542	1,0777	-73,90	-41,10	0,30	3,70
1000	1,0504	1,1000	-76,05	-44,67	0,06	-0,31
1100	1,0488	1,1164	-78,30	-48,06	-0,37	-4,33
1200	1,0483	1,1303	-80,62	-51,22	-1,20	-8,26
1300	1,0483	1,1431	-82,99	-54,41	-1,92	-12,27
1400	1,0483	1,1551	-85,43	-57,44	-2,83	-16,28
1500	1,0492	1,1682	-87,91	-60,37	-3,89	-20,28
1600	1,0509	1,1839	-90,45	-63,11	-5,20	-24,30

В уравнении реакции (5) отношение кислорода к железу равно 1,333. Для сохранения в уравнениях реакций (6) и (7) такого же отношения кислорода к железу продукты реакций (5) и (6) приняты исходными веществами соответственно для реакций (6) и (7). Результаты расчетов представлены в табл. 3.

Из табл. 3 видно, что изменения стандартной энергии Гиббса реакции (5) в указанном интервале температур отрицательны, следовательно, равновесие реакции сдвинуто в сторону образования вюстита, обогащенного кислородом. Изменения стандартной энергии Гиббса реакций (6) и (7) становятся отрицательными при температурах соответственно выше 1000 и 900 К, следовательно, равновесие реакций сдвигается в сторону образования продуктов реакций.

В случае, когда газообразным продуктом реакций восстановления вюстита графитом будет оксид углерода II, уравнения реакций выглядят следующим образом:

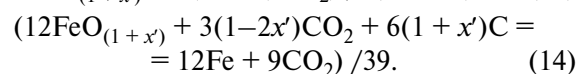
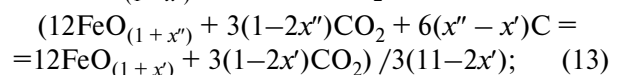
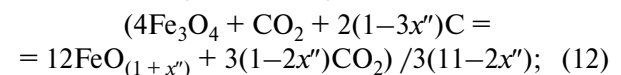
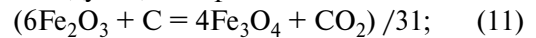


В уравнении реакции (8) отношение кислорода к железу постоянно при данной температуре. Для сохранения в уравнениях реакций (9) и (10) отношения кислорода к железу, равного $(1 + x'')$, продукты реакций (8) и (9) были исходными веществами соответственно для реакций (9) и (10). Результаты расчетов представлены в табл. 3.

Как видно из табл. 3, равновесие реакций (8), (9), (10) восстановления вюстита в большей степени сдвигается в сторону образования продуктов реакций при температурах соответственно выше 1000 и 900 К.

В случае, когда газообразный продукт реакций взаимодействия оксидов железа с графитом — оксид углерода (IV), составы системы (рис. 2, табл. 4) отличаются от приведенных выше (см. рис. 1, табл. 1).

Уравнения реакций восстановления оксида железа III графитом в расчете на 1 моль атомов исходных веществ в этом случае могут быть записаны следующим образом:



В табл. 5 представлены результаты расчетов изменения стандартной энергии Гиббса для реакций (11)–(14) в интервале температур 900–1600 К. Как видно из табл. 5, изменения стандартной энергии Гиббса реакций (11) и (12) отрицательны, следовательно, равновесие реакций сдвинуто в сторону образования продуктов реакций. Изменения стандартной энергии Гиббса реакций (13) и (14) становятся отрицательными при температурах выше 1000 К, то есть равновесие реакций сдвигается вправо, в сторону получения соответственно вюстита, обогащенного железом, и металлического железа.

Таблица 3

Изменения стандартной энергии Гиббса для реакций (5)–(10) в интервале температур 900–1600 К

T, К	ΔG° , кДж/моль, для разных реакций					
	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
900	-46,39	0,34	4,04	0,42	4,69	4,76
1000	-50,47	0,07	-0,34	0,09	-0,39	-0,40
1100	-54,34	-0,42	-4,72	-0,50	-5,36	-5,59
1200	-57,95	-1,35	-9,01	-1,60	-10,13	-10,67
1300	-61,59	-2,17	-13,39	-2,53	-14,94	-15,86
1400	-65,06	-3,19	-17,75	-3,70	-19,67	-21,02
1500	-68,42	-4,39	-22,12	-5,02	-24,31	-26,18
1600	-71,59	-5,86	-26,51	-6,62	-28,86	-31,33

Таблица 4

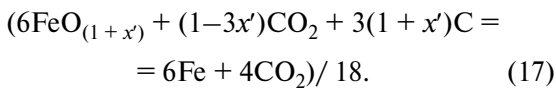
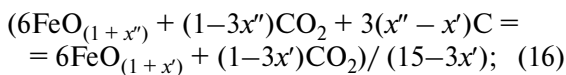
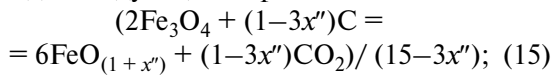
Составы системы, отвечающие реакциям (11)–(20), на концентрационном треугольнике Fe–O–C

Содержание, элемент	Содержание, %, для разных реакций и температур									
	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)	(18)	(19)	(20)
<i>T</i> = 900 K										
O	58,06	55,33	55,09	46,15	54,18	53,92	44,45	51,58	41,19	40,84
Fe	38,71	36,88	36,72	30,77	40,63	40,44	33,33	47,86	38,22	38,74
C	3,23	7,79	8,19	23,08	5,19	5,64	22,22	0,56	20,59	20,42
<i>T</i> = 1000 K										
O	–	55,55	55,05	–	54,42	53,88	–	51,77	41,51	40,78
Fe	–	37,04	36,70	–	40,82	40,41	–	47,06	37,74	38,83
C	–	7,41	8,25	–	4,76	5,71	–	1,17	20,75	20,39
<i>T</i> = 1100 K										
O	–	55,72	55,03	–	54,61	53,86	–	51,92	41,74	40,76
Fe	–	37,15	36,69	–	40,95	40,39	–	46,51	37,39	38,86
C	–	7,13	8,28	–	4,44	5,75	–	1,57	20,87	20,38
<i>T</i> = 1200 K										
O	–	55,87	55,03	–	54,76	53,85	–	52,06	41,93	40,75
Fe	–	37,25	36,69	–	41,07	40,39	–	46,05	37,10	38,87
C	–	6,88	8,28	–	4,17	5,76	–	1,89	20,97	20,38
<i>T</i> = 1300 K										
O	–	56,00	55,03	–	54,90	53,85	–	52,19	42,11	40,75
Fe	–	37,34	36,69	–	41,18	40,39	–	45,65	36,84	38,87
C	–	6,66	8,28	–	3,92	5,76	–	2,16	21,05	20,38
<i>T</i> = 1400 K										
O	–	56,13	55,03	–	55,04	53,85	–	52,30	42,27	40,75
Fe	–	37,42	36,69	–	41,28	40,39	–	45,28	36,59	38,87
C	–	6,45	8,28	–	3,68	5,76	–	2,42	21,14	20,38
<i>T</i> = 1500 K										
O	–	56,27	55,04	–	55,19	53,86	–	52,44	42,45	40,77
Fe	–	37,51	36,69	–	41,39	40,40	–	44,89	36,33	38,85
C	–	6,22	8,27	–	3,42	5,74	–	2,67	21,22	20,38
<i>T</i> = 1600 K										
O	–	56,43	55,06	–	55,37	53,88	–	52,61	42,65	40,79
Fe	–	37,62	36,70	–	41,53	40,41	–	44,44	36,03	38,81
C	–	5,95	8,24	–	3,10	5,71	–	2,95	21,32	20,40

Из сравнения данных табл. 2 и 5 следует, что при температурах 900–1600 К равновесия реакций (1), (2), (11) и (12) взаимодействия оксидов железа III и железа III, II с графитом характеризуются близкими отрицательными значениями изменения стандартной энергии Гиббса, что свидетельствует о том, что газообразными продуктами реакций в равной степени могут быть оксиды углерода II и IV.

Экспериментальные данные работы [10] по изучению кинетики восстановления оксида железа III графитом при 1223 К показывают, что в начальный период реакции в газовой фазе приблизительно в равной степени присутствуют оксиды углерода II и IV.

В случае, когда газообразным продуктом реакций восстановления оксида железа III, II графитом — оксид углерода IV, уравнения реакций выглядят следующим образом:



Результаты расчетов изменения стандартной энергии Гиббса для реакций (15)–(17) в интервале температур 900–1600 К представлены в табл. 6. Из нее видно, что изменения стандартной энергии Гиббса реакции (15) в указанном интервале температур отрицательны, следовательно, равновесие реакции сдвинуто в сторону образования вюстита, обогащенного кислородом.

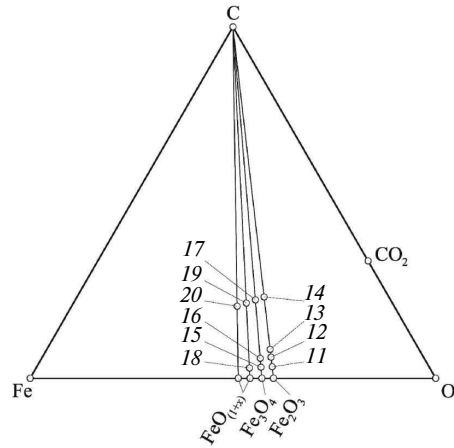


Рис. 2. Концентрационный треугольник Fe–O–C с координатами реакций (11)–(20)

Изменения стандартной энергии Гиббса реакций (16) и (17) становятся отрицательными при температурах выше 1000 К, значит, равновесие реакций сдвигается в сторону получения соответственно вюстита, обогащенного железом, и металлического железа.

Из сравнения данных табл. 3 и 6 видно, что при температурах 900–1600 К равновесия реакций (5) и (15) взаимодействия оксидов железа (III, II) с графитом характеризуются близкими отрицательными значениями изменения стандартной энергии Гиббса, что свидетельствует о том, что газообразными продуктами реакций в равной степени могут быть оксиды углерода II и IV.

Таблица 5

Изменения стандартной энергии Гиббса для реакций (11)–(14) в интервале температур 900–1600 К

T, К	ΔG, кДж/моль, для разных реакций			
	(11)	(12)	(13)	(14)
900	-76,70	-44,91	0,27	2,46
1000	-78,35	-47,78	0,11	0,37
1100	-80,11	-50,59	-0,13	-1,75
1200	-81,94	-53,25	-0,70	-3,78
1300	-83,83	-56,01	-1,09	-5,92
1400	-85,79	-58,67	-1,61	-8,07
1500	-87,80	-61,29	-2,22	-10,21
1600	-89,87	-63,82	-2,98	-12,37

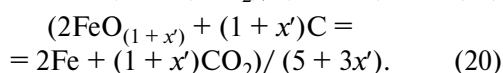
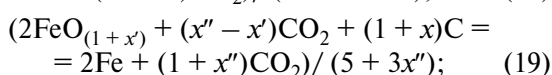
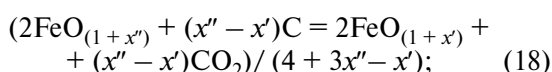
Таблица 6

Изменения стандартной энергии Гиббса для реакций (15)–(20) в интервале температур 900–1600 К

T, К	ΔG, кДж/моль, для разных реакций					
	(15)	(16)	(17)	(18)	(19)	(20)
900	-49,47	0,29	2,66	0,35	3,05	3,09
1000	-52,65	0,12	0,40	0,14	0,45	0,47
1100	-55,77	-0,14	-1,89	-0,16	-2,12	-2,21
1200	-58,71	-0,77	-4,09	-0,88	-4,56	-4,77
1300	-61,77	-1,20	-6,42	-1,36	-7,09	-7,48
1400	-64,73	-1,78	-8,74	-1,99	-9,59	-10,19
1500	-67,64	-2,45	-11,06	-2,72	-12,06	-12,89
1600	-70,44	-3,28	-13,40	-3,61	-14,48	-15,61

Экспериментальные данные работы [10] по изучению кинетики восстановления оксида железа III, II графитом при 1223 К показывают, что в начальный период реакции в газовой фазе приблизительно в равной степени присутствуют оксиды углерода II и IV.

Если газообразным продуктом реакций восстановления вюстита графитом — оксид углерода IV, уравнения реакций записываются следующим образом:



В табл. 6 представлены результаты расчетов изменения стандартной энергии Гиббса для реакций (18)–(20) в интервале температур 900–1600 К. Из табл. 6 видно, что изменения стандартной энергии Гиббса указанных реакций становятся отрицательными при температурах выше 1000 К, следовательно, равновесие реакций сдвигается в сторону образования продуктов реакций.

Анализ данных табл. 3 и 6 показывает, что значения изменения стандартной энергии Гиббса реакций (8), (9), (18) и (19) восстановления вюстита графитом характеризуются более положительными величинами по сравнению со значениями изменения стандартной энергии Гиббса реакций (5) и (15) восстановления оксида железа III, II графитом. Это свидетельствует о том, что равновесие реакций (8), (9), (18) и (19)

восстановления вюстита графитом в большей степени сдвинуто в сторону исходных веществ, чем равновесие реакций (5) и (15).

Данный факт подтверждается экспериментальными данными по кинетике процесса восстановления оксида железа III графитом при температурах 1173–1373 К [11, 12]. После быстрого завершения первой ступени процесса восстановления ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4$) получала развитие вторая ступень ($\text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{FeO}$), но с резко замедленными скоростями; особенно медленно проходило восстановление вюстита на этапе от максимального содержания кислорода до минимального.

Сравнение данных табл. 3 и 6 показывает, что выше 1000 К изменения стандартной энергии Гиббса реакции (10) характеризуются более отрицательными значениями по сравнению с реакцией (20), т. е. при взаимодействии вюстита, обогащенного кислородом, с графитом в газовой фазе следует ожидать большего содержания оксида углерода II по сравнению с оксидом углерода IV. По данным работ [10, 12] при восстановлении вюстита до железа графитом в интервале 1223–1273 К газовая фаза состоит приблизительно на 70–80 % из оксида углерода II.

Из данных табл. 3 и 6 видно, что равновесие реакций (10) и (20) восстановления вюстита, равновесного с железом, до металлического железа в большей степени сдвигается в сторону продуктов реакций при температурах соответственно выше 900 и 1000 К. Следовательно, при этих температурах следует ожидать появления металлического железа, что подтверждается экспериментальными данными: при 973 К замет-

ного восстановления оксида железа III, II графитом не обнаружено; при 1073 К отмечено появление металлического железа [2, 10].

Полученные результаты расчетов изменения стандартной энергии Гиббса реакций взаимо-

действия оксидов железа и графита с учетом изменения состава вюститита при изменении температуры в интервале 900–1600 К на 1 моль атомов исходных веществ согласуются с экспериментальными данными по кинетике изученных реакций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Павлов, М.А. *Металлургия чугуна. Ч. 2. Доменный процесс* [Текст] / М.А. Павлов.— 6-е изд.— М.: Metallurgizdat, 1949. 628 с.
2. Байков, А.А. *Восстановление окислов железа твердым углеродом* [Текст] / А.А. Байков, А.С. Тумарев // Изв. АН СССР. ОТН.— 1937. № 1.— С. 25–47.
3. Шенк, Г. *Физико-химия металлургических процессов. Ч. 1. Химико-металлургические реакции и их законы* [Текст] / Г. Шенк / Пер. с нем. под ред. Б.Л. Фрадкина.— Харьков: Гос. науч.-техн. изд-во Украины, 1935.— 384 с.
4. Есин, О.А. *Физическая химия пирометаллургических процессов. Ч. 1. Реакции между газообразными и твердыми фазами* [Текст] / О.А. Есин, П.В. Гельд.— Свердловск, 1962.— 672 с.
5. *Доменное производство* [Текст]: Справ. изд. в 2 т. Т. 1. Подготовка руд и доменный процесс / Под ред. Е.Ф. Вегмана.— М.: Metallurgia, 1989.— 469 с.
6. Демидов, А.И. *Термодинамика взаимодействия углерода с кислородом* [Текст] / А.И. Демидов, И.А. Маркелов // ЖПХ.— 2005. Т. 78, № 4.— С. 721–724.
7. Демидов, А.И. *Термодинамика горения топлива уфурм-доменной печи* [Текст] / А.И. Демидов, И.А. Маркелов // ЖПХ.— 2005. Т. 78, № 9.— С. 1565–1567.
8. Varin, I. *Thermochemical properties of Inorganic Substances* [Текст] / I. Varin, O. Knacke, O. Kubaschewski.— New York: Springer-Verlag, 1973.— 921 p.
9. Демидов, А.И. *Термодинамика взаимодействия магнетита и вюститита с монооксидом углерода с учетом изменения состава вюститита при изменении температуры* [Текст] / А.И. Демидов, И.А. Маркелов // Научно-техн. ведомости СПбГПУ.— 2013. № 1 (166).— С. 166–169.
10. Abdel Halim, K.S. *Isothermal reduction behavior of Fe₂O₃/MnO composite materials with solid carbon* [Текст] / K.S. Abdel Halim // *Materials Science and Engineering A*.— 2007. Vol. 452–453.— P. 15–22.
11. Архаров, В.И. *Исследование восстановления окислов железа графитом* [Текст] / В.И. Архаров, В.Н. Богословский, М.Г. Журавлева, Г.И. Чуфаров // ЖФХ.— 1955. Т. XXIX. Вып. 2.— С. 272–279.
12. Симонов, В.К. *Некоторые вопросы кинетики и механизма восстановления окиси железа углеродом* [Текст] / В.К. Симонов, С.Т. Ростовцев // Изв. вузов. Сер.: Черная металлургия.— 1960. № 4.— С. 5–18.

ДЕМИДОВ Александр Иванович — доктор химических наук, профессор кафедры физико-химии и технологии микросистемной техники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия
(812) 3223083
demidov1902@gmail.com

МАРКЕЛОВ Илья Александрович — аспирант Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия
markelov-ia@yandex.ru