

УДК 669-1

Е. Л. КОРЗУН (канд. техн. наук, доц.),
А. Г. ПОНОМАРЕНКО (д-р техн. наук, проф.)

О ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОМ ОПИСАНИИ ЖИДКИХ РАСТВОРОВ КИСЛОРОДА В ЖЕЛЕЗЕ

На основе анализа результатов исследований равновесных состояний гетерогенных металлургических систем Fe-CO-CO₂, Fe-H₂-H₂O подтверждена выполнимость закона Генри для растворенного в железе кислорода. Уточнена температурная зависимость коэффициента Генри для кислорода в жидком железе.

кислород, железо, термодинамика, температура, константа равновесия

Для успешного внедрения автоматизации в управление металлургическими процессами при выплавке стали необходимо создать модель (алгоритм расчета), позволяющую предсказывать концентрации отслеживаемых компонентов во всех трех фазах металлургического агрегата и их температуру. При этом прогноз должен обладать достаточной инженерной точностью. Как правило, в определении концентраций речь идет о сотых долях процента, а при определении температуры – о погрешности в десять – двадцать градусов. Одной из основных трудностей построения такого алгоритма является отсутствие единых модельных представлений для разных реагирующих фаз. Более частной проблемой является сложность инженерных расчетов концентрации компонентов в металле: для части компонентов металлического раствора признается адекватным использование законов предельно разбавленных растворов (например, марганец, кремний и др.), для другой части компонентов металла постулируется неидеальное поведение (углерод, кислород и др.). Целью данной публикации является уточнение вопроса поведения кислорода в растворе железа.

Одним из первых об особенностях поведения кислорода в расплавах на основе железа рассказали Ш.Маршалл и Дж.Чипман [1]. Они «пришли к выводу, что коэффициенты активности углерода и кислорода не остаются постоянными, а изменяются в зависимости от содержания в расплаве углерода» [2]. Результатом длительных дискуссий [1-19] стало общепринятое мнение о том, что поведение кислорода в расплавах на основе железа не соответствует гипотезе разбавленных растворов, что и зафиксировано в учебных пособиях, например [20].

Кислород обладает ограниченной растворимостью в жидком железе. Даже насыщенные растворы характеризуются преимущественным содержанием железа. Можно предположить, что ненасыщенные растворы кислорода в железе ведут себя как разбавленные растворы, в которых поведение растворителя близко к поведению компонента в идеальном растворе. При анализе фактических данных концентрацию целесообразнее выражать в мольных долях или атомных процентах, так как именно эти способы выражения дают реальное соотношение количества частиц раствора без учёта влияния атомных масс компонентов раствора. В качестве компонентов газовой и конденсированной фаз рассматриваем химические элементы.

Критерием подчиненности поведения растворённого компонента законам разбавленных растворов выбрали соответствие закону Генри [21], который для кислорода, растворённого в железе можно записать в виде:

$$x_{[O]} = k_H^{(O)} \cdot P_{\{O\}} \quad (7)$$

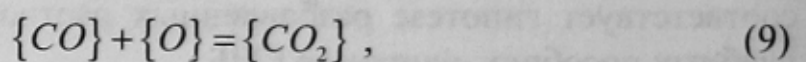
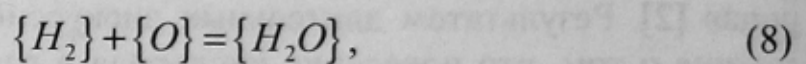
где $x_{[O]}$ – концентрация кислорода в металле, м.д.;

$P_{\{O\}}$ – парциальное давление кислорода в газовой фазе над жидким металлом;

$k_H^{(O)}$ – константа Генри для компонента для кислорода, растворённого в железе.

Для анализа поведения кислорода в расплавах железа использовали экспериментальные данные, приведенные в работах [1, 6, 7, 12, 13, 15, 18]. Авторы работы [1, 13, 18] изучали поведение кислорода и углерода в системе расплав железа – смесь газов CO и CO₂. При проведении экспериментов авторами работ [6, 12, 15] контролировалось соотношение парциальных давлений водяных паров и водорода в системе и содержание кислорода в металле. В работе [7] эксперименты по равновесию проводили как с использованием газовой смеси CO и CO₂, так и H₂-H₂O.

Для проверки выполнимости уравнения (7) рассчитывали величины парциального давления атомарного кислорода в газовой фазе, которые находили из соответствующих выражений констант равновесия следующих реакций:



соответственно:

$$K_1 = \frac{P_{\{H_2O\}}}{P_{\{H_2\}} \cdot P_{\{O\}}}, \quad (10)$$

$$K_2 = \frac{P_{\{CO_2\}}}{P_{\{CO\}} \cdot P_{\{O\}}}, \quad (11)$$

где K_1 - константа равновесия реакции окисления водорода (8),

$P_{\{H_2O\}}$ - парциальное давление паров воды, атм,

$P_{\{H_2\}}$ - парциальное давление водорода, атм,

K_2 - константа равновесия реакции окисления угарного газа (9),

$P_{\{CO_2\}}$, $P_{\{CO\}}$ - парциальные давления оксидов углерода, атм.

Из выражения (10) получаем:

$$P_{\{O\}} = \frac{P_{\{H_2O\}}}{P_{\{H_2\}} \cdot K_1}, \quad (12)$$

причем, соотношение $\frac{P_{\{H_2O\}}}{P_{\{H_2\}}}$ измерялось непосредственно в эксперименте,

т.е. для определения парциального давления атомарного кислорода необходимо рассчитать только константу равновесия реакции (8).

Аналогично из выражения (11) получаем:

$$P_{\{O\}} = \frac{P_{\{CO_2\}}}{P_{\{CO\}} \cdot K_2} \quad (13)$$

Расчет констант равновесия K_1 , K_2 производился с помощью данных о приведенных термодинамических потенциалах (Φ) компонентов газовой фазы [22]:

$$K = \exp\left(\frac{\Delta\Phi(T)}{R} - \frac{\Delta H^0}{RT}\right), \quad (14)$$

где $\Delta\Phi(T)$ - изменение приведенного термодинамического потенциала системы при протекании химической реакции при температуре T ;

ΔH^0 - изменение энтальпии системы при протекании реакции при $T = 0 K$,

R - универсальная газовая постоянная.

Используемые для дальнейших расчётов значения константы равновесия реакции образования водяного пара (8) представлены в табл. 1.

Таблица 1 Значение константы равновесия реакции образования водяного пара.

Темпера-тура, К	Значение константы K_1	Темпера-тура, К	Значение константы K_1
1823	101 482 329,00	1894	29 033 537,01
1824	99 642 388,40	1918	19 418 589,75
1847	65 771 240,84	1923	17 880 117,24
1858	54 115 394,51	1924	17 588 268,73
1870	43 856 337,08	1973	8 013 444,25
1873	41 628 583,82		

Экспериментальные данные работ по изучению равновесия в системе Fe-H₂-H₂O [6, 7, 12, 15] использовали для корреляционного анализа концентрации кислорода в железе от парциального давления атомарного кислорода в газовой фазе. При пересчете концентрации кислорода в мольные доли не учитывалось содержание примесных элементов в металле. В качестве гипотезы использовали уравнение линии, проходящей через точку начала координат, $y = b \cdot x$, как отвечающее виду закона Генри. Результаты корреляционного анализа представлены на рис. 1 – 4 и в табл. 2.

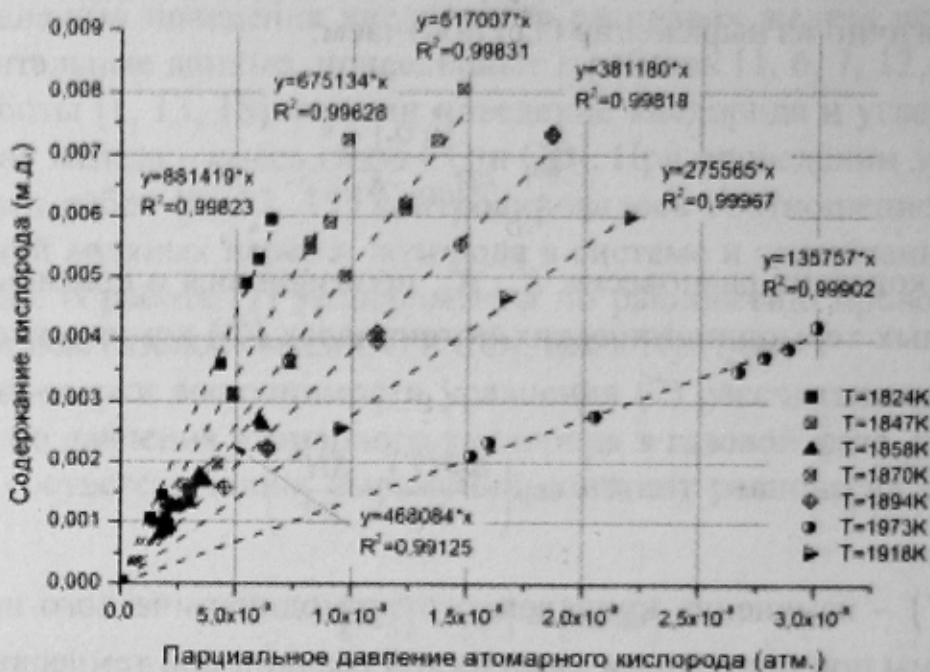


Рисунок 1 – Зависимость концентрации кислорода в железе от парциального давления атомарного кислорода по экспериментальным данным работы [6].

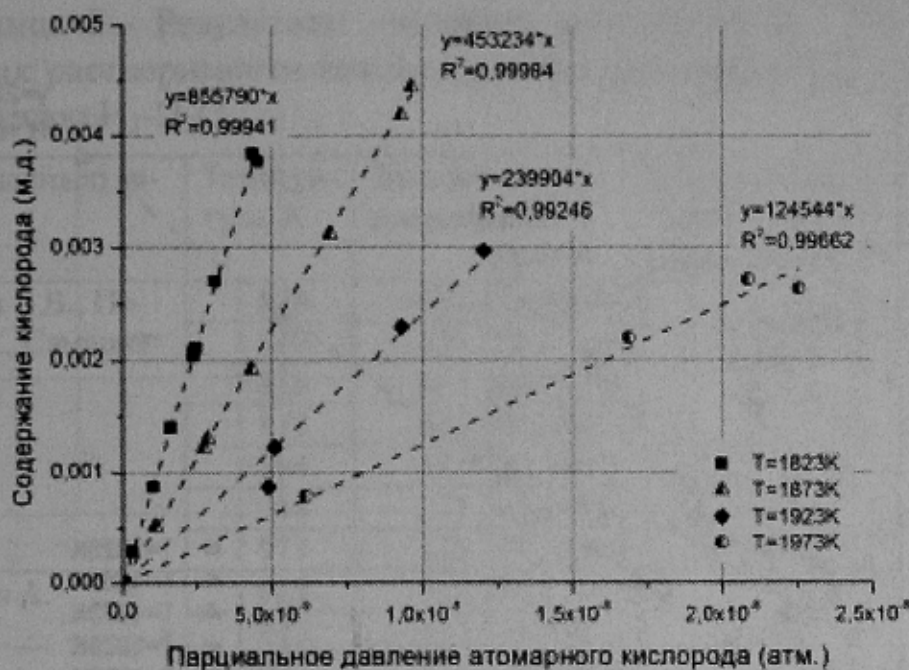


Рисунок 2 – Зависимость концентрации кислорода в железе от парциального давления атомарного кислорода по экспериментальным данным работы [7].

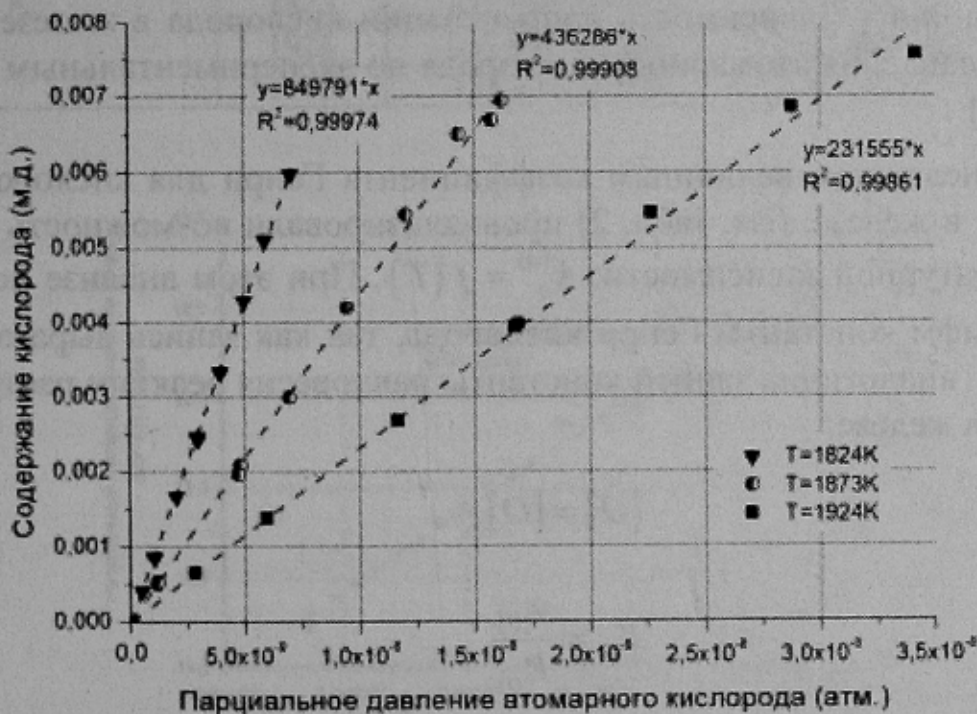


Рисунок 3 – Зависимость концентрации кислорода в железе от парциального давления атомарного кислорода по экспериментальным данным работы [12].

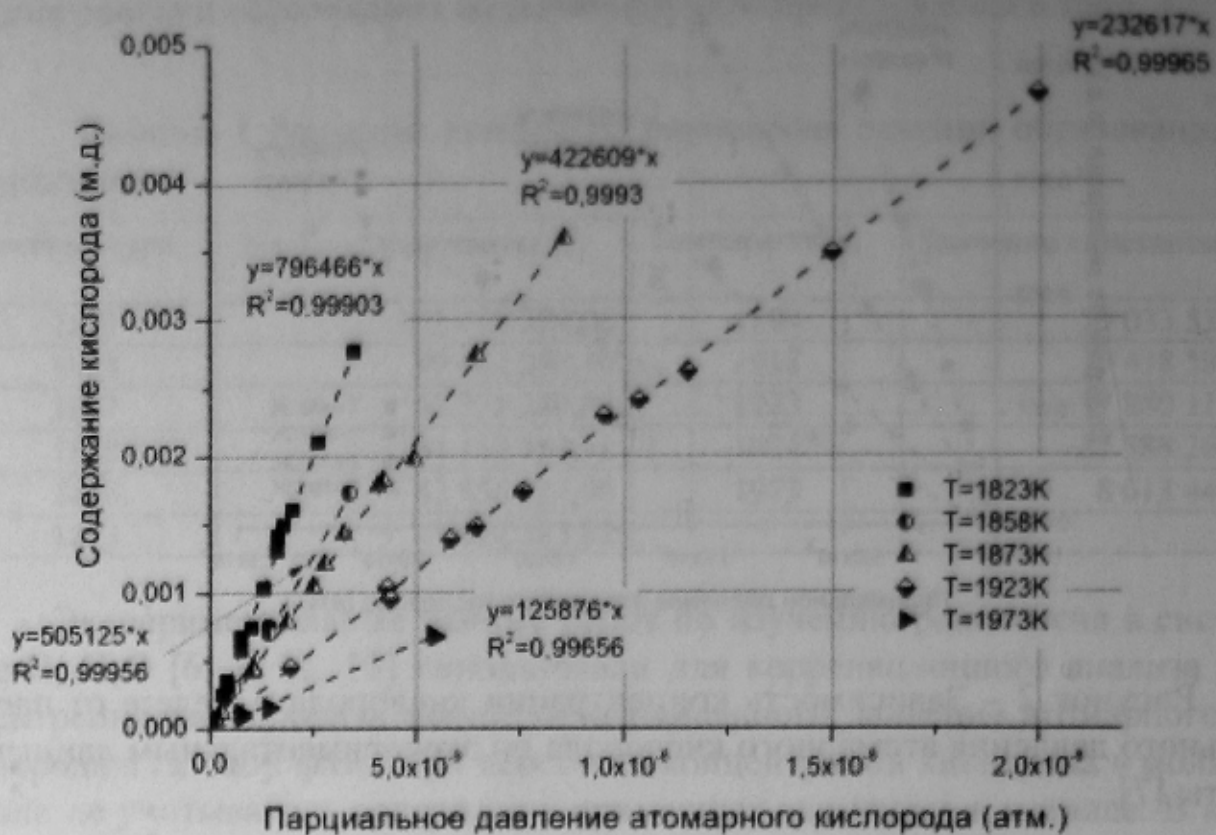


Рисунок 4 – Зависимость концентрации кислорода в железе от парциального давления атомарного кислорода по экспериментальным данным работы [15].

По численным величинам коэффициента Генри для кислорода, растворённого в железе, (см. табл. 2) проанализировали возможность получения температурной зависимости: $k_H^{(O)} = f(T)$. При этом анализе использовали логарифм константы Генри кислорода, так как запись выражения закона Генри аналогична записи константы равновесия реакции растворения кислорода в железе:

$$\{O\} = [O]_{Fe}, \quad (15)$$

$$K_O = \frac{a_{[O]}}{P_{\{O\}}}, \quad (16)$$

а константа равновесия, как известно, зависит от температуры по экспоненциальной зависимости (уравнение изотермы $\ln K = -\Delta G / RT$).

Результаты анализа температурной зависимости приведены на рис.5.

Таблица 2 - Результаты линейной аппроксимации экспериментальных данных растворимости кислорода в жидком железе при равновесии с газовой смесью H_2-H_2O .

Источник данных, авторы	Температура, К	Значение коэффициента b	Максимальное отклонение коэффициента b	Коэффициент корреляции r
[6], Аверин В.В., Поляков А.Ю., Самарин А.М.	1 824	881 418,64098	14 035,42644	0,99911
	1 847	675 134,37294	13 042,70900	0,99814
	1 858	468 084,24356	9 592,22664	0,99562
	1 870	517 006,84839	6 410,84348	0,99915
	1 894	381 180,14978	5 420,56586	0,99909
	1 918	275 565,36663	2 504,73225	0,99983
	1 973	135 757,19230	1 502,19176	0,99951
[7], Gokcen A.	1 823	855 790,11187	6 565,79342	0,99970
	1 873	453 233,99275	2 044,98717	0,99992
	1 923	239 903,62770	9 346,19265	0,99622
	1 973	124 543,88604	3 244,07149	0,99831
[12], Sakao H., Sano K.	1824	849 790,87143	4 327,33715	0,99987
	1873	436 286,17626	4 001,61785	0,99954
	1924	231 555,32440	2 877,50864	0,99930
[15], Omori Y., Suzuki K., Aratani F., Sanbongi K.	1823	796 465,77315	6 399,51991	0,99951
	1858	505 124,74633	3 200,80822	0,99978
	1873	422 609,43495	2 440,68204	0,99965
	1923	232 616,66816	1 251,38428	0,99982
	1973	125 875,51259	2 463,41979	0,99828

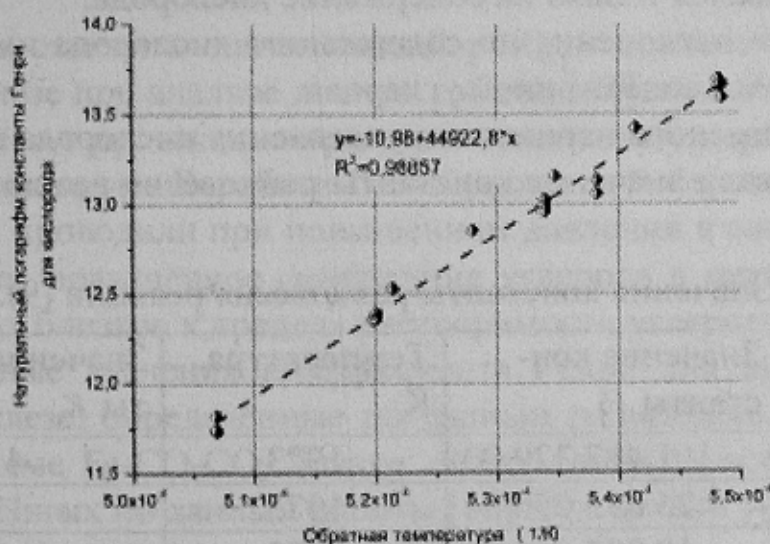


Рисунок 5 – Температурная зависимость константы Генри для кислорода, растворённого в железе, вида $\ln k_H^{(o)} = A + \frac{B}{T}$.

Таким образом, температурная зависимость коэффициента Генри для кислорода в железе описывается уравнением

$$\ln k_H^{(o)} = \frac{44\,922,8}{T} - 10,98 \quad (17)$$

При анализе результатов исследований равновесия в системе Fe-CO-CO₂ необходимо отметить следующие особенности.

- 1) Растворимость углерода в железе выше, чем растворимость водорода при исследовании равновесия в системе Fe-H₂-H₂O, это, с одной стороны, оказывает влияние на растворимость кислорода в железе, с другой стороны вызывает кипение металла при его затвердевании и снижения точности анализа за счёт удалившихся при кипении части кислорода и углерода, а с третьей стороны вызывает выделения чистого графита в твёрдом металле, отобранном на анализ. Последнее в свою очередь приводит к увеличению погрешности при измерении содержания кислорода в пробе металле.
- 2) Непосредственной измерение содержания кислорода в металле затруднено низким его уровнем. Величины концентраций кислорода в железе близки по уровню с погрешностью метода определения.
- 3) Только в двух работах [1, 13] металл одной пробы анализировался на содержание и кислорода и углерода. Однако в работе [13] не приводятся данные по равновесному составу газовой фазы, что делает невозможным использование экспериментальных данных этой работы в анализе поведения кислорода по выбранной нами схеме. В работах [7, 18] металл анализировался только на содержание кислорода.
- 4) Самые большие отклонения по содержанию кислорода имеет металл с наиболее высоким содержанием углерода.

Для расчёта равновесного парциального давления кислорода в системе Fe-CO-CO₂ использовали значения константы равновесия реакции (9), приведенные в табл. 3.

Таблица 3 - Значения константы равновесия реакции (9).

Температура, К	Значение константы K_1	Температура, К	Значение константы K_1
1813	101 482 329,00	1923	4 142 712,35
1823	25 835 090,84	1973	1 779 100,23
1873	10 094 404,98	2023	796 830,68
1888	7 689 162, 68		

При пересчете концентрации кислорода в мольные доли учитывали содержание углерода в железе и не учитывали содержание других элемен-

тов в металле. В качестве гипотезы, как и в случае анализа экспериментальных данных по системе Fe-H₂-H₂O, использовали линейную гипотезу, как отвечающую виду закона Генри. Результаты корреляционного анализа представлены на рис. 6, 7 и в табл. 4.

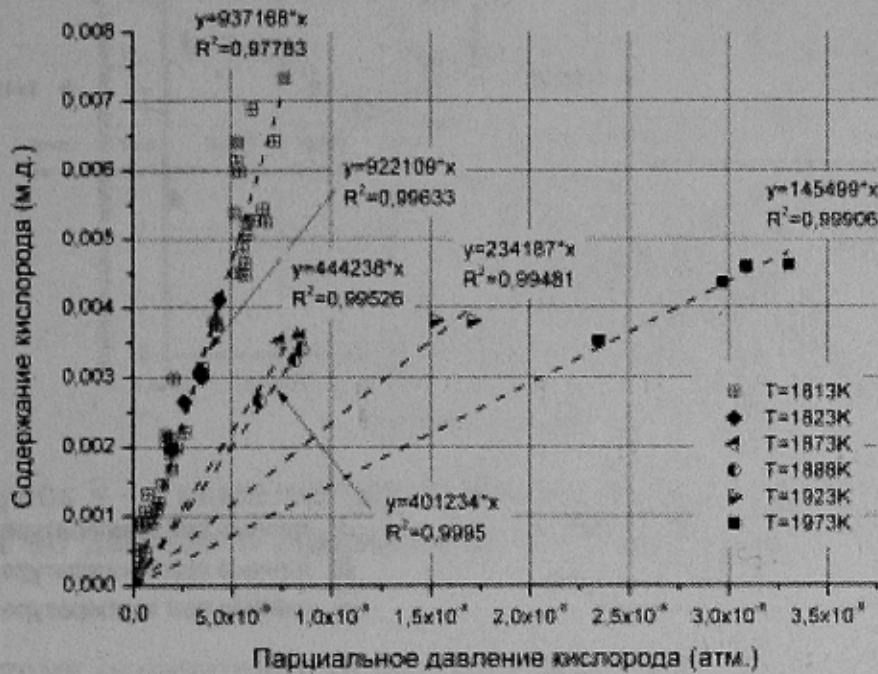
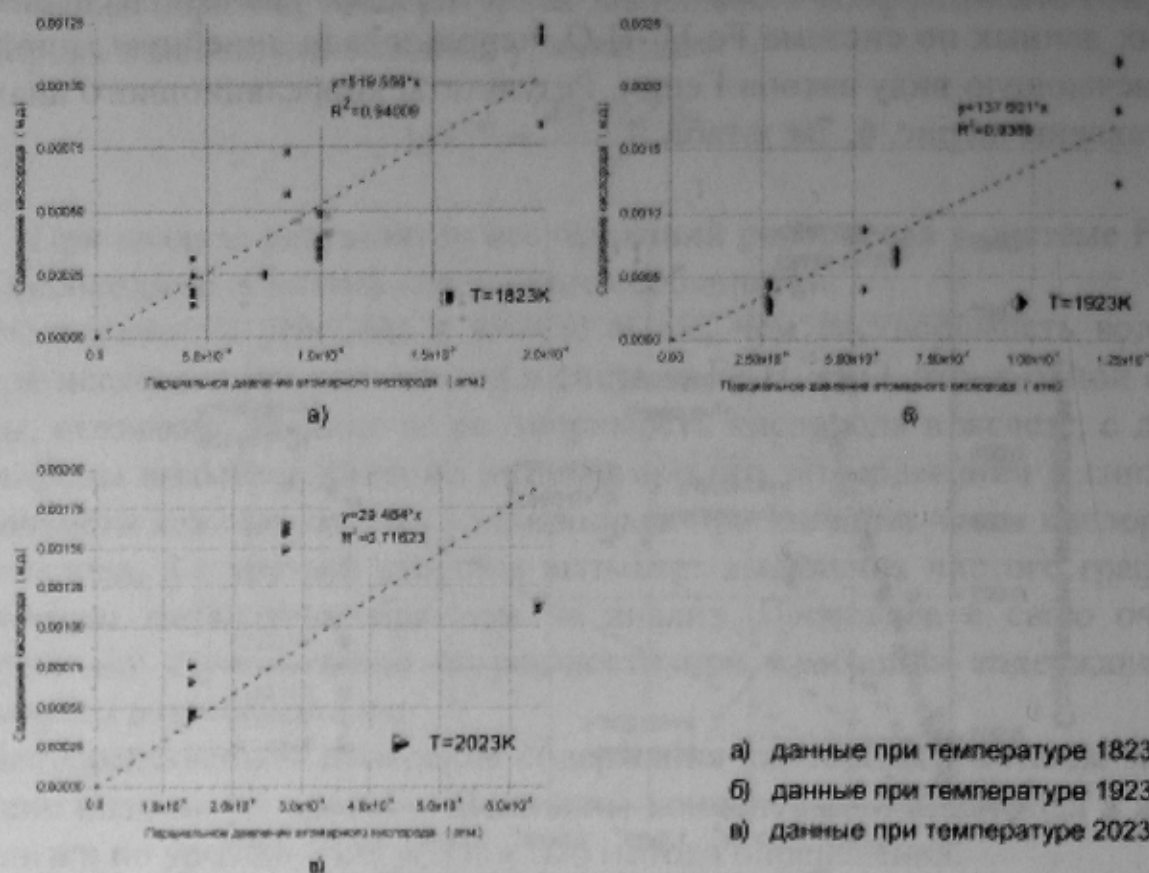


Рисунок 6 – Зависимость концентрации кислорода в железе от парциального давления атомарного кислорода по экспериментальным данным работ [1, 7].

Следует отметить значительный разброс значений содержания кислорода в железе при анализе данных работы [18], что, на наш взгляд, могло быть вызвано с протеканием реакции окисления углерода при снижении температуры металла. В работе Эль-Каддаха и Робертсона [18] эксперименты опыты проводили при повышенном давлении в системе, обуславливая тем самым повышенное содержание углерода в металле в некоторых экспериментах близкое к пределу растворимости углерода в железе.

Численные значения коэффициента Генри для кислорода, растворённого в железе, определённые по данным равновесия в системе Fe-H₂-H₂O и в системе Fe-CO-CO₂ близки между собой за исключением значений, определённых по данным работы [18]. Это можно увидеть на графике зависимости $k_H^{(o)} = f(T)$ (рис.8).



- а) данные при температуре 1823К;
 б) данные при температуре 1923К;
 в) данные при температуре 2023К.

Рисунок 7 – Зависимость концентрации кислорода в железе от парциального давления атомарного кислорода по экспериментальным данным работы [18].

Таблица 4 - Результаты линейной аппроксимации экспериментальных данных растворимости кислорода в жидком железе при равновесии с газовой смесью CO-CO₂.

Источник данных, авторы	Температура, К	Значение коэффициента b	Стандартная ошибка определения значения коэффициента b	Коэффициент корреляции r
[1], Marshall Sh, Chipman J.	1 813	937 168	22 030	0,98913
[7], Gokcen A.	1 823	922 109	21 159	0,99842
	1 873	444 238	17 688	0,99842
	1 888	401 234	4 467	0,99981
	1 923	234 187	9 762	0,99827
	1 973	145 499	1 991	0,99963
[18], El-Kaddah N.H., Robertson D.G.C.	1 823	519 556	29 282	0,96958
	1 923	137 601	7 971	0,96794
	2 023	29 484	5 071	0,84630

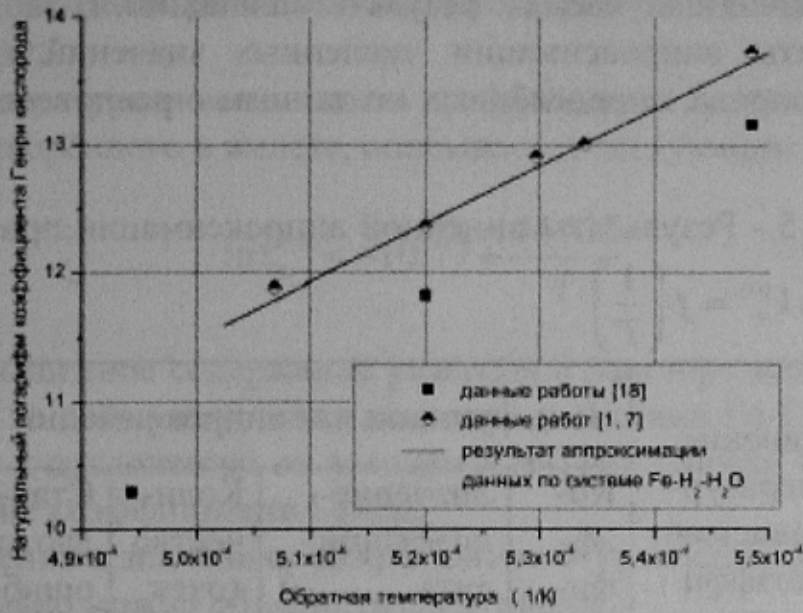


Рисунок 8 – Сравнение результатов расчёта коэффициента Генри для кислорода по данным о равновесном состоянии систем Fe-H₂-H₂O и Fe-CO-CO₂.

Поэтому окончательный вид температурной зависимости коэффициента Генри определяем по данным о равновесном состоянии обеих рассматриваемых систем по результатам работ [1, 6, 7, 12, 15] (рис.9).

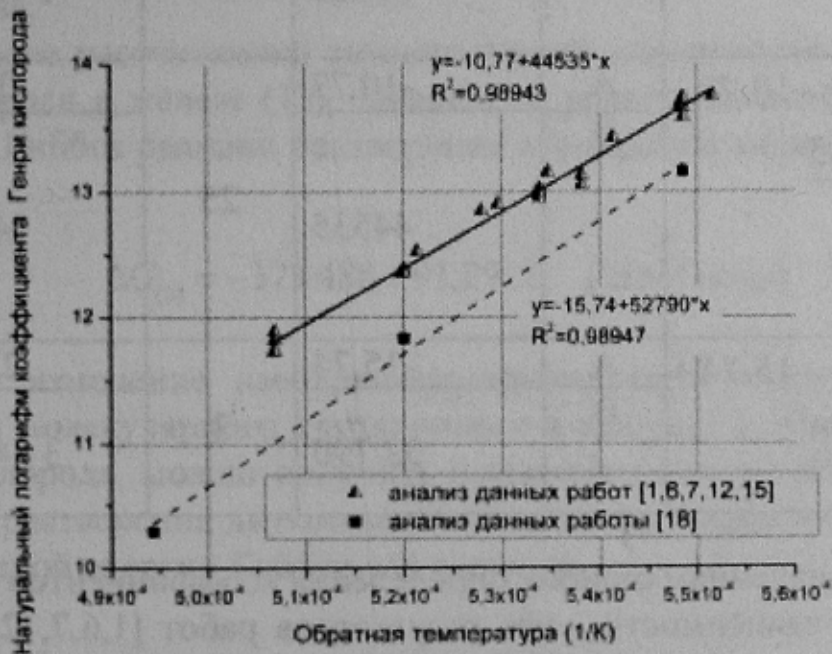


Рисунок 9 – Результат расчёта температурной зависимости коэффициента Генри для кислорода по данным о равновесном состоянии систем Fe-H₂-H₂O и Fe-CO-CO₂.

Результаты работы [18] мы предлагаем рассматривать отдельно ввиду резкого отличия получаемых результатов анализа. В таблице 5 приведены результаты аппроксимации численных значений коэффициентов Генри для кислорода, определённых по данным о равновесии в различных системах.

Таблица 5 - Результаты линейной аппроксимации при исследовании зависимости $\ln k_H^{(o)} = f\left(\frac{1}{T}\right)$

Равновесная система, источник данных	Уравнение температурной зависимости коэффициента Генри для кислорода, растворённого в железе	Вид функции для аппроксимации $\ln k_H^{(o)} = A + \frac{B}{T}$				
		Коэффициент	Значение коэффициента	Количество точек для аппроксимации	Стандартная ошибка определения значения коэффициента	Коэффициент корреляции r
Fe-H ₂ -H ₂ O, [6,7,12,15]	$\ln k_H^{(o)} = -10,98 + \frac{44\,923}{T}$	A	-10,98	19	0,60	0,994
		B	44 923		1 138	
Fe-H ₂ -H ₂ O, Fe-CO-CO ₂ , [1,6,7,12,15]	$\ln k_H^{(o)} = -10,77 + \frac{44\,535}{T}$	A	-10,77	25	0,5	0,992
		B	44535		940	
Fe-CO-CO ₂ , [18]	$\ln k_H^{(o)} = -15,74 + \frac{52\,790}{T}$	A	-15,74	3	2,0	0,995
		B	52 790		3 841	

Судя по значениям ошибок определения коэффициентов в уравнении температурной зависимости, учёт результатов работ [1,6,7,12,15] ведёт к уточнению гипотезы, определённой на этапе анализа данных по системе Fe-H₂-H₂O. Таким образом, по результатам анализа экспериментальных данных по изучению поведения кислорода при равновесных состояниях в системах Fe-H₂-H₂O и Fe-CO-CO₂, можно сделать следующие выводы:

- поведение кислорода, растворённого в жидком железе подчиняется законам разбавленных растворов и, в частности, закону Генри;
- температурная зависимость коэффициента Генри для кислорода, растворённого в железе, описывается следующим выражением:

$$\ln k_H^{(o)} = -10,77 + \frac{44\,535}{T} \quad (18)$$

- повышенное содержание углерода в растворе железа, достигнутое за счёт увеличения давления в системе Fe-CO-CO₂, приводит к отклонению от зависимости (18), снижая численное значение коэффициента Генри.

Расхождение в значениях коэффициентов уравнений аппроксимации предположительно можно объяснить следующим:

- на результаты измерений содержания кислорода в железе при равновесии в системе Fe-CO-CO₂ сильное влияние оказывает содержание растворённого углерода, в то время как для металла системы Fe-H₂-H₂O растворимость могущего оказывать аналогичное влияние водорода чрезвычайно низка;
- существенное содержание углерода в железе при экспериментах в системе Fe-CO-CO₂ оказывает влияние на растворимость кислорода в железе.

На основе рассчитанной температурной зависимости коэффициента Генри кислорода в железе (18) определено уравнение изменения свободной энергии Гиббса реакции растворения атомарного кислорода в жидком железе (15):

$$\Delta G_{(9)} = -373\,488 + 91,29 \cdot T \quad (\text{Дж/моль}) \quad (19)$$

Если учесть изменение изобарно-изотермического потенциала реакции диссоциации молекулярного двухатомного кислорода с образованием атомарного кислорода, можно получить выражение изменения энергии Гиббса реакции растворения двухатомного кислорода в жидком железе. Изменение свободной энергии Гиббса для реакции



рассчитывали с помощью данных [22]. Для температурного интервала T=1500÷2300K:

Таблица 6 - Изменение свободной энергии Гиббса реакции растворения кислорода в жидком железе по данным различных авторов.

$\Delta G_o^0, \text{Дж/моль}$	$\Delta G_o^0, \text{Дж/моль}$ при $T=1873\text{K}$	Метод исследования	Источник данных, автор, год опублико- вания
-138 416+8,54*T	-122 418	Равновесие в системе Fe-CO-CO ₂	[1, 24], Marshall Sh, Chipman J., 1942
-116 937-2,39*T	-121 407	Равновесие в системе Fe-H ₂ -H ₂ O	[14], Dastur M.N., Chipman J., 1949
-119 366-2,39*T	-121 407	Обобщение литературных данных по равновесию в системе Fe-CO-CO ₂	[10], Chipman J., 1951
-123 804-0,502*T	-122 863	Равновесие в системах Fe-H ₂ -H ₂ O, Fe-CO-CO ₂	[7], Gokcen A., 1956
-71 134-28,55*T	-124 615	Равновесие в системе Fe-H ₂ -H ₂ O	[16], Сюй Цзэн-Цзи, Поляков А.Ю., Самарин А.М., 1963
-117 230-2,89*T	-122 641	Обобщение литературных данных	[17], Chipman J., Elliott J.F., 1963
-114 383-5,57*T	-124 813	Обобщение литературных данных	[25], Белов Б.Ф., Новохатский И.А., Лобанов Ю.А., 1967
-181 246+32,07*T	-121 179	Э.д.с.	[23], Fischer W.A., Ackermann W., 1966
-137 118+7,79*T	-122 527	Э.д.с.	[23], Janke D., Fischer W.A., 1975
-117 230+25,12*T	-70 179	Нет данных	[26], Swisher J.H., Turkdogan E.T., 1967
-117 000-13,23*T	-141 780	Нет данных	[27], Sigworth G.K., Elliott J.F., 1974
-115 660-14,42*T	-142 676	Обобщение литературных данных	[19], Chiang T., Chang Y.A., 1976
-117 110-3,39*T	-123 459	Нет данных	[28], справочник, 1988
-118 473+24,6*T	-72 397	Анализ экспериментальных данных в данной работе	
-118 473-3,295*T	-118 473		

$$\Delta G'_{(14)} = 255\,016 - 66,69 \cdot T \quad (\text{Дж/моль}) \quad (21)$$

Складывая реакции (15) и (20), получим:

$$\frac{1}{2}\{O_2\} = [O] \quad (22)$$

и соответствующим сложением выражений (19) и (21), получим выражение изменения свободной энергии Гиббса реакции растворения молекулярного двухатомного кислорода в жидком железе:

$$\Delta G_{(17)} = -118\,473 + 24,6 \cdot T \quad (\text{Дж/моль}) \quad (23)$$

Отмечая совпадение полученного выражение с аналогичными, имеющимися в литературе, (табл. 6), можно подтвердить правильность расчёта коэффициента Генри для кислорода.

Резкие различия в числовых значениях изменений свободной энергии Гиббса (более 30000 Дж/моль) связаны различным выражением концентрации кислорода: более высокие значения (-70179, -72098) соответствуют выражению концентрации кислорода в мольных долях, а более низкие значения (-142679 ÷ -118473 Дж/моль) соответствуют выражению концентрации в массовых процентах.

Таким образом:

1. На основе анализа экспериментальных данных подтверждено, что растворы кислорода в железе являются разбавленными. Для кислорода, растворённого в железе выполняется закон Генри.
2. Уточнено значение коэффициента Генри для кислорода:

$$k_{II}^{(o)} = \exp\left(\frac{44\,922,8}{T} - 10,98\right).$$

Список литературы.

1. Marshall Sh, Chipman J. The Carbon-oxygen Equilibrium in Liquid Iron // Transactions of the American Society for Metals – v.30, №9, 1942 – p.695-746.
2. Самарин А.М., Карасев Р.А. К вопросу об активностях углерода и кислорода в расплавах железо-углерод-кислород // Известия АН СССР. Отделение технических наук - №8, 1953 – С.1130-1135.
3. Старк Б.В. Критика работы Маршалла и Чипмана по вопросу активности углерода и кислорода в жидкой стали // Известия АН СССР. Отделение технических наук - №5, 1948 – С.655-671.
4. Самарин А.М., Шварцман Л.А. Активности углерода и кислорода, растворенных в жидком железе // Известия АН СССР. Отделение технических наук - №8, 1949 – С.1231-1234.
5. Yagihashi T. On the Treatment of the Reaction between Gas-Mixture H₂O-H₂ and Molten Iron in Steel-Making // Science reports of the Research Institutes, Tohoku University. Ser. A, Physics, chemistry and metallurgy – v.4, 1952 – p.139-149.
6. Аверин В.В., Поляков А.Ю., Самарин А.М. Активность кислорода в жидком железе // Известия АН СССР. Отделение технических наук - №3, 1955 – С.90-107.

7. Gokcen A. Equilibria in Reactions of Hydrogen, and Carbon Monoxide with Dissolved Oxygen in Liquid Iron; Equilibrium in Reduction of Ferro Oxide with Hydrogen, and Solubility of Oxygen in Liquid Iron // Transactions AIME. Journal of Metals – 1956, vol.206, November – p.1558-1567.
8. Флоридис Т.П., Чипмен Дж. Активность кислорода в жидких сплавах на основе железа // Проблемы современной металлургии - №2, 1958 – С.3-12.
9. Самарин А.М. Физико-химические основы раскисления стали – М.: Изд-во АН СССР, 1959 – 64с.
10. Производство стали в основной мартеновской печи – М.: Металлургиздат, 1959. – 710с.
11. Самарин А.М. Кислород в сплавах железа. Теоретические основы металлургических процессов. – Ротапринтное издание Института металлургии им. А.А. Байкова АН СССР. – 1959.
12. Sakao H., Sano K. Equilibrium between Dissolved Oxygen in Liquid Iron and H₂-H₂O Gas Mixtures // Transactions of the Japan Institute of Metals – vol.1, No 1, 1960 – p.38-42.
13. Фува Т, Чипман Дж. Равновесие углерод-кислород в жидком железе // Проблемы современной металлургии - №3, 1961 – С.3-11.
14. Эллиотт Д.Ф. Равновесие углерода – кислорода в жидком железе / Физическая химия сталеварения – М.: Металлургиздат, 1963 – С.71-77.
15. Activity of Oxygen in Liquid Iron / Omori Y., Suzuki K., Aratani F., Sanbongi K. // Bulletin of the Research Institute of Mineral Dressing and Metallurgy, Tohoku University – v.23(2), 1968 – p.115-127.
16. Сьюй Цзэн-Цзи, Поляков А.Ю., Самарин А.М. Термодинамические характеристики реакции взаимодействия углерода и кислорода в жидком железе // Применение вакуума в металлургии. Вып.3 – М.: Изд-во АН СССР, 1963 – С.3-9.
17. Чипман Дж., Эллиотт Дж. Физическая химия жидкой стали / Производство стали в электропечах (сборник статей) – М.: Металлургия, 1965 – С.92-166.
18. El-Kaddah N.H., Robertson D.G.C. Equilibria in Reactions of CO and CO₂ with Dissolved Oxygen and Carbon in Liquid Iron // Metallurgical Transactions B – v.8B, 1977, No12 – p.569-579.
19. Chiang T., Chang Y.A. The Activity Coefficient of Oxygen in Binary Liquid Metal Alloys // Metallurgical Transactions B – 1976 – v.7B, №9. – p.453-467.
20. Григорян В.А., Белянчиков Л.Н., Стомахин А.Я. Теоретические основы электросталеплавильных процессов. – М.: Металлургия, 1987. – 270с.
21. Бажин Н.М., Иванченко В.А., Пармон В.Н. Термодинамика для химиков. – М.: Химия, КолосС, 2004. – 416с.
22. Термические константы веществ. Справочник под ред. В.П. Глушко. – М.: АН СССР, ВИНТИ, ИВТ, 1965. вып. I, 145 с; 1966, вып. II, 95 с; 1968, вып. III, 221 с; 1970, вып. IV, ч. I; 509 с; 1971, вып. V, 530 с; 1972, вып. VI, ч. I, 369 с; 1974, вып. VII, ч. I, 343 с.
23. Vogel M.E. Messung und Modellierung der Sauerstoffaktivität in Schmelzen aus hochlegiertem Stahlguss / Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades Doktor-Ingenieur – 2002 // http://deposit.ddb.de/cgi-in/dokserv?idn=965771237&dok_var=d1&dok_ext=pdf&filename=965771237.pdf
24. Мартеновское производство стали (основной процесс) – М.: Металлургиздат, 1947 – 572с.

25. Белов Б.Ф., Новохатский И.А., Лобанов Ю.А. Определение предельной растворимости кислорода в расплавленных железе, кобальте и никеле // Известия АН СССР. Металлы – 1967, №3 – С.53-62.
26. Фромм Е., Гебхардт Е. Газы и углерод в металлах. – М.: Металлургия, 1980. – 712с.
27. The Fe-O (Iron-Oxygen) System // Journal of Phase Equilibria, vol. 12, №2, 1991 – p.170-200.
28. Улучшение технологии внепечной обработки колёсной стали / Шибаетов С.С., Гарбер А.К., Григорович К.В. и др.// Электротеталлургия - №12, 2007 – С.2-12.

Надійшла до редколегії 23.09.2009.

Є. Л. КОРЗУН, О. Г. ПОНОМАРЕНКО
ДВНЗ «Донецький національний
технічний університет»

E. L. KORZUN, A. G. PONOMARENKO
SHSI «Donetsk National Technical Univer-
sity»

Про термодинамічний опис рідких розчинів кисню в залізі. На основі аналізу результатів досліджень рівноважних станів гетерогенних металургійних систем Fe-CO-CO₂, Fe-H₂-H₂O підтверджена здійсненність закону Генрі для розчиненого в залізі кисню. Уточнена температурна залежність коефіцієнту Генрі для кисню в рідкому залізі.

About the Thermodynamic Description of Liquid Solutions of Oxygen in Iron. Feasibility of Henry law for oxygen dissolved in iron is confirmed by the study of equilibrium conditions of heterogeneous metallurgical systems Fe-CO-CO₂, Fe-H₂-H₂O. Temperature dependence of Henry coefficient for oxygen in liquid iron is specified.

кисень, залізо, термодинаміка, температура, константа рівноваги

oxygen, iron, thermodynamics, temperature, equilibrium constant

© Е. Л. Корзун, А. Г. Пономаренко, 2009