



Оригинальная статья

УДК 669.15:544.35:546.11:546.74

DOI 10.17073/0368-0797-2022-7-519-525

<https://fermet.misis.ru/jour/article/view/2346>



ВАГНЕРОВСКИЙ ПАРАМЕТР ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВОДОРОДА С НИКЕЛЕМ В ЖИДКОЙ СТАЛИ

Л. А. Большов, С. К. Корнейчук, Э. Л. Большова

Вологодский государственный университет (Россия, 160000, Вологда, ул. Ленина, 15)

Аннотация. К растворам водорода в жидких сплавах системы Fe–Ni применена простейшая модель структуры и межатомного взаимодействия, которая ранее (2019 – 2021) использована авторами для растворов азота в сплавах систем Fe–Cr, Fe–Mn, Fe–Ni, Ni–Co и Ni–Cr. Теория основана на решеточной модели растворов Fe–Ni. Предполагается модельная решетка типа ГЦК. В узлах этой решетки находятся атомы железа и никеля. Атомы водорода располагаются в октаэдрических междоузлиях. Атом водорода взаимодействует лишь с атомами металлов, находящимися в соседних с этим атомом узлами решетки. Это взаимодействие парное. Предполагается, что энергия этого взаимодействия не зависит ни от состава сплава, ни от температуры. Для простоты принимается, что жидкие растворы в системе Fe–Ni являются совершенными. В рамках предложенной теории представлено выражение для вагнеровского параметра взаимодействия водорода с никелем в жидкой стали. Правая часть соответствующей формулы представляет собой функцию отношения констант закона Сиверта для растворимости водорода в жидких железе и никеле. Значения этих констант для температуры 1873 К приняты равными $K'_H(\text{Fe}) = 0,0025$, $K'_H(\text{Ni}) = 0,0040$ % (по массе). При этом получена оценка для вагнеровского параметра взаимодействия водорода с никелем в жидкой стали $\epsilon_H^{\text{Ni}} = -0,54$. Это соответствует значению лангенберговского параметра взаимодействия $e_H^{\text{Ni}} = -0,002$, что очень близко к экспериментальной оценке $e_H^{\text{Ni}} = -0,0022$.

Ключевые слова: термодинамика, растворы, водород, железо, никель, коэффициент активности, вагнеровский параметр взаимодействия, лангенберговский параметр взаимодействия, закон Сиверта

Для цитирования: Большов Л.А., Корнейчук С.К., Большова Э.Л. Вагнеровский параметр взаимодействия водорода с никелем в жидкой стали // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 7. С. 519–525. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-7-519-525>

Original article

WAGNER COEFFICIENT OF INTERACTION BETWEEN HYDROGEN AND NICKEL IN LIQUID STEEL

L. A. Bol'shov, S. K. Korneichuk, E. L. Bol'shova

Vologda State University (15 Lenina Str., Vologda 16000, Russian Federation)

Abstract. The simplest model of the structure and interatomic interaction is applied to hydrogen solutions in liquid alloys of Fe–Ni system, which earlier (2019 – 2021) was used by the authors for nitrogen solutions in alloys of Fe–Cr, Fe–Mn, Fe–Ni, Ni–Co and Ni–Cr systems. The theory is based on lattice model of the Fe–Ni solutions. The model assumes a FCC lattice. In the sites of this lattice are the atoms of Fe and Ni. Hydrogen atoms are located in octahedral interstices. The hydrogen atom interacts only with the metal atoms located in the lattice sites neighboring to it. This interaction is pairwise. It is assumed that the energy of this interaction depends neither on the alloy composition nor on the temperature. For simplicity it was assumed that liquid solutions in the Fe–Ni system are perfect. Within the framework of the proposed theory an expression is presented for the Wagner coefficient of interaction between hydrogen and nickel in liquid steel. The right-hand part of the appropriate formula is a function of the ratio of the Sieverts law constants for hydrogen solubility in liquid iron and in liquid nickel. The values of these constants for a temperature of 1873 K are taken equal to $K'_H(\text{Fe}) = 0,0025$, $K'_H(\text{Ni}) = 0,0040$ wt. %. At the same time, an estimate was obtained for the Wagner coefficient of interaction between hydrogen and nickel in liquid steel $\epsilon_H^{\text{Ni}} = -0,54$. This corresponds to the value of the Langenberg interaction coefficient $e_H^{\text{Ni}} = -0,002$, which is very close to the experimental estimate $e_H^{\text{Ni}} = -0,0022$.

Keywords: thermodynamics, solutions, hydrogen, iron, nickel, activity coefficient, Wagner interaction coefficient, Langenberg interaction coefficient, Sieverts law

For citation: Bol'shov L.A., Korneichuk S.K., Bol'shova E.L. Wagner coefficient of interaction between hydrogen and nickel in liquid steel. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 7, pp. 519–525. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-7-519-525>

В металлургии стали водород известен как вредный элемент, который должен быть максимально полно удален из жидкого металла. Поэтому возможность теоретического предсказания растворимости водорода в расплаве стали представляет значительный практический интерес. Методы расчета растворимости водорода и азота в многокомпонентных сплавах на основе железа начали развиваться примерно с середины прошлого века. Сначала эти методы относились только к малоконцентрированным сплавам. Они основывались на термодинамической теории многокомпонентных малоконцентрированных сплавов, берущей начало с известной монографии [1]. В этой работе были введены термодинамические параметры взаимодействия между растворенными компонентами сплава, которые в настоящее время часто называют вагнеровскими параметрами взаимодействия. Используя эту идею, Ф. Лангенберг [2] предложил метод расчета растворимости азота в низколегированной жидкой стали. При этом он ввел термодинамические параметры взаимодействия, которые можно назвать лангенберговскими. Попытка преодолеть ограничение малоконцентрированности при расчете растворимости азота в расплаве стали, ограничившись сплавами переходных металлов, была сделана в работах [3, 4]. Исходными величинами для расчета в этих исследованиях являются вагнеровские параметры взаимодействия азота с легирующими переходными металлами в жидких сплавах на основе железа. При этом для вывода расчетных формул необходимо, не ограничиваясь одной лишь феноменологией, использовать модельные представления и к ним применять принципы статистической механики.

Заметим, что помимо подходов, основанных на термодинамических параметрах взаимодействия, существуют и другие подходы к расчету растворимости водорода в жидкой стали. Примером является метод эквивалентных концентраций [5, 6]. Этот подход является менее обоснованным теоретически.

Таким образом, для предсказания растворимости водорода в жидкой стали важно знать значение вагнеровских или лангенберговских параметров взаимодействия водорода с легирующими элементами. Попытки теоретического изучения этого вопроса имели место еще в 60-х годах прошлого века [7]. Они продолжают и в настоящее время [8]. Однако проблема не может считаться исчерпанной. Точность экспериментальных данных по растворимости водорода в жидких металлах и сплавах также оставляет желать лучшего [8]. Целью настоящей работы является теоретическая оценка значений термодинамических параметров взаимодействия первого порядка [9] водорода с никелем в жидкой стали при температуре 1873 К.

Рассмотрим термодинамику жидкого раствора системы Fe–Ni–H. Концентрации компонентов этого раствора, выраженные в мольных долях, обозначим как c_{Fe} ,

c_{Ni} , c_{H} соответственно. Другой способ выражения этих концентраций, принятый в практической металлургии, это проценты по массе (массовые проценты). Концентрации компонентов рассматриваемого раствора, выраженные в процентах по массе, обозначим как [% Fe], [% Ni], [% H] соответственно. Растворимость газа H_2 при парциальном давлении водорода в газовой фазе P_{H_2} в сплавах системы Fe–Ni обозначим как [% H]*. При $P_{\text{H}_2} \rightarrow 0$ имеет место закон Сиверта [10]:

$$[\% \text{ H}]^* = K'_{\text{H}} \sqrt{\frac{P_{\text{H}_2}}{P_0}},$$

где P_0 – стандартное давление ($P_0 = 1 \text{ атм} \approx 0,101 \text{ МПа}$), K'_{H} – константа закона Сиверта для растворимости водорода в сплавах Fe–Ni. Пусть $K'_{\text{H}} = K'_{\text{H}}(\text{Fe})$ при $c_{\text{Fe}} = 1$ и $K'_{\text{H}} = K'_{\text{H}}(\text{Ni})$ при $c_{\text{Ni}} = 1$.

Экспериментальные значения $K'_{\text{H}}(\text{Fe})$ для растворимости водорода в жидком железе при абсолютной температуре $T = 1873 \text{ К}$ по данным наиболее известных исследований, опубликованных с 1911 по 1990 г., представлены в табл. 1. Всего в этой таблице показаны данные девятнадцати исследований. Наименьший из приведенных результатов составляет 0,00220 % (по массе), наибольший отвечает значению $K'_{\text{H}}(\text{Fe}) = 0,00279 \text{ %}$ (по массе). Среднее арифметическое значение представленных результатов приходится на $K'_{\text{H}}(\text{Fe}) = 0,00250 \text{ %}$ (по массе). С этим значением совпадают результаты, полученные в работах [23, 24, 26].

Большинство приведенных результатов получены путем измерения растворимости водорода в жидком железе методом Сиверта [10], но в некоторых из цитируемых работ использованы методы закалки образцов и левитационного плавления [26].

В работах [22, 25, 27] приведены обширные литературные данные, относящиеся к периодам с 1911 г. по год опубликования результатов экспериментальных исследований авторов указанных работ. По этим данным легко найти соответствующие средние арифметические значения $K'_{\text{H}}(\text{Fe})$ при 1873 К. Эти значения оказываются равны 0,00249 [22]; 0,00247 [25]; 0,00250 % (по массе) [27].

Согласно справочной информации [30], $K'_{\text{H}}(\text{Fe}) = 0,00246 \text{ %}$ (по массе); по материалам обзорной статьи [31], $K'_{\text{H}}(\text{Fe}) = 0,00242 \text{ %}$ (по массе). Авторы монографии [32] приводят значение $K'_{\text{H}}(\text{Fe}) = 0,00270 \text{ %}$ (по массе). Учитывая все приведенные выше мнения, авторы настоящей работы останавливаются на значении $K'_{\text{H}}(\text{Fe}) = 0,00250 \text{ %}$ (по массе) при $T = 1873 \text{ К}$.

Экспериментальные значения константы закона Сиверта $K'_{\text{H}}(\text{Ni})$ для растворимости водорода в жидком никеле при $T = 1873 \text{ К}$, полученные различными исследователями за период с 1910 по 1990 г., приведены в табл. 2. Всего в этой таблице представлены результаты десяти исследований.

Т а б л и ц а 1

Экспериментальные значения константы закона Сиверта $K'_H(\text{Fe})$ для растворимости водорода в жидком железе при температуре 1873 K

Table 1. Experimental values of the Sieverts law constant $K'_H(\text{Fe})$ for solubility of hydrogen in liquid iron at a temperature of 1873 K

Исследователи	Год	$K'_H(\text{Fe})$, % (по массе)	Источник
Сивертс, Крумбхар, Юриш	1911	0,00265	[11]
Сивертс, Цапф, Мориц	1938	0,00234	[12]
Лян, Бевер, Флоу	1946	0,00279	[13]
Карнаухов, Морозов	1948	0,00224	[14]
Буш, Дод	1960	0,00268	[15]
де Козинци, Линдберг	1960	0,00254	[16]
Шенк, Вюнш	1961	0,00220	[17]
Маскава, Накагава	1961	0,00237	[18]
Вайнштейн, Эллиот	1963	0,00246	[19]
Бэгшоу, Энгледов, Митчел	1965	0,00249	[20]
Шенк, Ланге	1966	0,00240	[21]
Сомено, Нагасаки, Кадои	1967	0,00246	[22]
Гунжи, Матоба, Оно	1967	0,00250	[23]
Като, Фукуда, Сугияма, Фурукава	1970	0,00250	[24]
Блосси, Пельке	1971	0,00264	[25]
Нгунен Нгиа, Явойский, Костерев, Афанасьев	1972	0,00250	[26]
Бурштейн, Пельке	1974	0,00249	[27]
Бестер, Ланге	1977	0,00254	[28]
Митра, Ланге	1990	0,00267	[29]

Наименьшее из представленных значений составляет $K'_H(\text{Ni}) = 0,00363$ % (по массе), наибольшее – $K'_H(\text{Ni}) = 0,00448$ % (по массе). Среднее арифметическое значение представленных результатов составляет $K'_H(\text{Ni}) = 0,00404$ % (по массе). В монографии [37] рекомендуется значение $K'_H(\text{Ni}) = 0,00407$ % (по массе), в монографии [32] – $K'_H(\text{Ni}) = 0,00423$ % (по массе). Авторы настоящей работы останавливаются на значении $K'_H(\text{Ni}) = 0,00400$ % (по массе) при $T = 1873$ K.

Следует отметить попытку теоретического вычисления растворимости водорода в чистых жидких металлах [38]. Обсуждение этой попытки выходит за рамки настоящей работы.

Далее рассмотрим термодинамику растворов водорода в жидких сплавах системы Fe–Ni.

Пусть a_H – термодинамическая активность водорода в жидком растворе; $\gamma_H = \frac{a_H}{c_H}$ – коэффициент актив-

ности водорода, иногда называемый рациональным коэффициентом активности; $f_H = \frac{a_H}{[\% \text{ H}]}$ – массово-про-

центный коэффициент активности водорода. Рассмотрим термодинамические параметры взаимодействия первого порядка водорода с никелем в жидкой стали:

$$\varepsilon_H^{\text{Ni}} = \frac{\partial \ln \gamma_H}{\partial c_{\text{Ni}}} \text{ при } c_{\text{Fe}} \rightarrow 1;$$

$$e_H^{\text{Ni}} = \frac{\partial \lg f_H}{\partial [\% \text{ Ni}]} \text{ при } [\% \text{ Fe}] \rightarrow 100.$$

Параметр $\varepsilon_H^{\text{Ni}}$ называется вагнеровским параметром взаимодействия [1], e_H^{Ni} можно назвать лангенберговским параметром взаимодействия [2]. Между вагнеровским и лангенберговским параметрами взаимодействия установлено [39] соотношение:

$$\varepsilon_H^{\text{Ni}} = 230,3 \frac{A_{\text{Ni}}}{A_{\text{Fe}}} e_H^{\text{Ni}} + \frac{A_{\text{Fe}} - A_{\text{Ni}}}{A_{\text{Fe}}}, \quad (1)$$

где A_{Fe} и A_{Ni} – атомные массы соответствующих элементов, $230,3 \approx 100 \ln 10$. Соотношение, обратное уравнению (1), запишется в виде:

$$e_H^{\text{Ni}} = \frac{1}{230,3} \frac{A_{\text{Fe}}}{A_{\text{Ni}}} \left(\varepsilon_H^{\text{Ni}} - \frac{A_{\text{Fe}} - A_{\text{Ni}}}{A_{\text{Fe}}} \right). \quad (2)$$

Далее предлагается простая теория термодинамических свойств жидких растворов водорода в сплавах системы Fe–Ni. Эта теория полностью аналогична теории для жидких растворов азота в сплавах системы

Т а б л и ц а 2

Экспериментальные значения константы закона Сиверта $K'_H(\text{Ni})$ для растворимости водорода в жидком никеле при температуре 1873 K

Table 2. Experimental values of the Sieverts law constant $K'_H(\text{Ni})$ for solubility of hydrogen in liquid nickel at a temperature of 1873 K

Исследователи	Год	$K'_H(\text{Ni})$, % (по массе)	Источник
Сивертс, Крумбхар	1910	0,00387	[33]
Буш, Дод	1960	0,00382	[15]
де Козинци, Линдберг	1960	0,00391	[16]
Шенк, Вюнш	1961	0,00363	[17]
Вайнштейн, Эллиот	1963	0,00410	[34]
Бэгшоу, Митчел	1966	0,00378	[35]
Шенк, Ланге	1966	0,00426	[21]
Ланге, Шенк	1969	0,00420	[36]
Блосси, Пельке	1971	0,00448	[25]
Митра, Ланге	1990	0,00437	[29]

Fe–Cr [40]. Теория основана на решеточной модели растворов Fe–Ni. Предполагается модельная решетка типа ГЦК. В узлах этой решетки располагаются атомы железа и никеля. Атомы водорода располагаются в октаэдрических междоузлиях. Атом водорода взаимодействует лишь с атомами металлов, находящимися в соседних с этим атомом узлах решетки. Это взаимодействие парное. Предполагается, что энергия этого взаимодействия не зависит ни от состава сплава, ни от температуры. Для простоты принимается, что жидкие растворы в системе Fe–Ni являются совершенными. Будем учитывать лишь конфигурационную составляющую энтропии сплава. Сформулированную модель рассматриваем методами статистической механики. Пользуясь результатами работы [40], для рассматриваемой модели имеем:

$$K'_H(\text{Ni}) = K'_H(\text{Fe}) \frac{A_{\text{Fe}}}{A_{\text{Ni}}} \left(1 - \frac{1}{6} \varepsilon_H^{\text{Ni}} \right)^6. \quad (3)$$

Решение уравнения (3) относительно параметра взаимодействия $\varepsilon_H^{\text{Ni}}$ имеет вид:

$$\varepsilon_H^{\text{Ni}} = 6 \left(1 - \sqrt[6]{\frac{A_{\text{Ni}} K'_H(\text{Ni})}{A_{\text{Fe}} K'_H(\text{Fe})}} \right). \quad (4)$$

Подставим в правую часть формулы (4) значения: $K'_H(\text{Fe}) = 0,0025$ % (по массе); $K'_H(\text{Ni}) = 0,0040$ % (по массе); $A_{\text{Fe}} = 55,847$; $A_{\text{Ni}} = 58,71$.

Получим: $\varepsilon_H^{\text{Ni}} = -0,54$ для $T = 1873$ К. Тогда формула (2) дает значение $e_H^{\text{Ni}} = -0,0020$.

Обратимся к эксперименту. Экспериментальные значения лангенберговского параметра взаимодействия e_H^{Ni} в жидкой стали при $T = 1873$ К, полученные различными исследователями за период с 1960 по 1972 г., представлены в табл. 3. Всего в этой таблице приведены результаты девяти исследований. Наименьший по абсолютному значению результат составляет $e_H^{\text{Ni}} = 0$, наибольший – $e_H^{\text{Ni}} = -0,0024$. Среднее арифметическое цитируемых результатов приходится на $e_H^{\text{Ni}} = -0,0013$. Это же значение рекомендовано в монографии [37]. Однако, по мнению авторов, первые четыре результата в табл. 3 следует рассматривать как предварительные. Среднее арифметическое последних пяти значений составляет $e_H^{\text{Ni}} = -0,0022$.

В работе [5] логарифм коэффициента активности водорода ($\lg f_H$), растворенного в жидком бинарном сплаве системы Fe– j (j – легирующий элемент), описывается эмпирической формулой, выражающей зависимость $\lg f_H$ от температуры T и концентрации легирующего элемента. Из этой формулы в работе [42] были определены значения вагнеровского параметра взаимодействия ε_H^j водорода с легирующим элементом j в жидкой стали при $T = 1873$ К. При этом получилось $\varepsilon_H^{\text{Ni}} = -0,54$. Согласно формуле (2), этому значению отвечает значение лангенберговского параметра взаимодействия

$e_H^{\text{Ni}} = -0,0020$. В работе [42] показано, что данные [5] хорошо отвечают теории по температурной зависимости вагнеровских параметров взаимодействия ε_H^j в жидкой стали [42], где j – переходный металл.

Принимая во внимание все отмеченные моменты, наиболее правдоподобным экспериментальным значением параметра взаимодействия e_H^{Ni} в жидкой стали при $T = 1873$ К следует признать $e_H^{\text{Ni}} = -0,0022$. Этому соответствует величина вагнеровского параметра взаимодействия $\varepsilon_H^{\text{Ni}} = -0,55$, что практически совпадает со значением, полученным теоретически в настоящей работе.

В работе [40] формула (3) получается из более общего уравнения для концентрационной зависимости константы закона Сиверта в жидких сплавах системы Fe– j . Для растворов водорода в сплавах системы Fe–Ni общее уравнение запишется в виде:

$$K'_H = K'_H(\text{Fe}) \frac{A_{\text{Fe}}}{A_m} \left(1 - \frac{1}{6} \varepsilon_H^{\text{Ni}} c_{\text{Ni}} \right)^6, \quad (5)$$

где $A_m = A_{\text{Fe}}(1 - c_{\text{Ni}}) + A_{\text{Ni}}c_{\text{Ni}}$.

Подставим в уравнение (5) значение $K'_H(\text{Fe}) = 0,0025$ % (по массе) и $\varepsilon_H^{\text{Ni}} = -0,54$. График полученной функции $K'_H(c_{\text{Ni}})$ представлен на рисунке. Там же показана экспериментальная кривая, отвечающая данным работы [29]. Функция $K'_H(c_{\text{Ni}})$ монотонно возрастает. Ее график обращен выпуклостью вниз.

Очевидно, что кривые, отвечающие теории и эксперименту, очень близки друг другу. Существенное отличие имеет место лишь вблизи концентраций никеля $c_{\text{Ni}} = 0$ и $c_{\text{Ni}} = 1$.

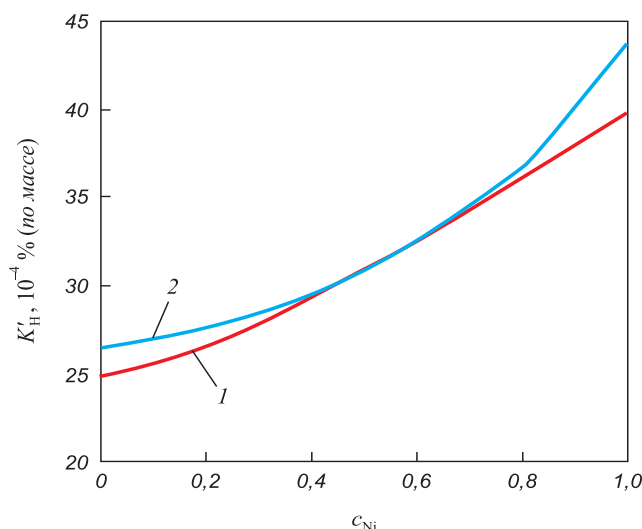
В заключение отметим следующий момент, касающийся применимости формул (3) и (4). Аналогичное

Таблица 3

Экспериментальные значения лангенберговского параметра взаимодействия e_H^{Ni} в жидкой стали при температуре 1873 К

Table 3. Experimental values of the Langenberg interaction coefficient e_H^{Ni} in liquid steel at a temperature of 1873 K

Исследователи	Год	e_H^{Ni}	Источник
Буш, Дод	1960	–0,0002	[15]
де Казинци, Линдберг	1960	–0,0007	[16]
Шенк, Вюнш	1961	–0,0008	[17]
Вайнштейн, Эллиот	1963	0	[34]
Гунжи, Оно, Аоки	1964	–0,0020	[41]
Сомено, Нагасаки, Кадои	1967	–0,0024	[22]
Като, Фукуда, Сугияма, Фурукава	1970	–0,0024	[24]
Блосси, Пельке	1971	–0,0019	[25]
Нгуен Нгиа, Явойский, Костерев, Афанасьев	1972	–0,0023	[26]



Константа закона Сиверта для растворимости водорода в сплавах Fe–Ni при $T = 1873$ К:

1 – теория, уравнение (5); 2 – эксперимент [29]

Sieverts law constant for hydrogen solubility in Fe–Ni alloys at $T = 1873$ K:

1 – theory, formula (5); 2 – experiment [29]

замечание было сделано в работе [43] по отношению к растворам азота в жидких сплавах системы Fe–Ni. Для простоты в настоящем исследовании было принято допущение, что жидкие растворы системы Fe–Ni являются совершенными. Однако вагнеровский параметр взаимодействия $\varepsilon_{\text{Ni}}^{\text{Ni}}$ в жидких сплавах на основе железа, оцененный по экспериментальным данным [44] в работе [45], оказался равным $\varepsilon_{\text{Ni}}^{\text{Ni}} = 1,7$. Это указывает на существенные отклонения от закона Генри в рассматриваемой системе. В работе [43] указывается, что для применимости формул типа (3) важна не идеальность растворов системы Fe–Ni, а лишь равенство нулю избыточной энтропии этих растворов. Поэтому требование идеальности растворов Fe–Ni может быть заменено требованием регулярности или субрегулярности [46] таких растворов.

Выводы

Предложена теория, которая предсказывает значение вагнеровского параметра взаимодействия $\varepsilon_{\text{H}}^{\text{Ni}} = -0,54$ в жидкой стали при температуре 1873 К. Это совпадает с экспериментальным значением [41].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Вагнер К. Термодинамика сплавов. Москва: Металлургиздат, 1957. 179 с.
2. Langenberg F.C. Predicting solubility of nitrogen in molten steel // *Journal of Metals*. 1956. Vol. 8. No. 8. P. 1099–1101.
3. Большов Л.А. О растворимости азота в жидких многокомпонентных сплавах железа с переходными металлами // *Известия вузов. Черная металлургия*. 1982. № 1. С. 8–10.
4. Большов Л.А. Статистическая теория многокомпонентных и малоконцентрированных сплавов: Диссертация ... доктора физико-математических наук. Москва: МГУ, 1991. 496 с.
5. Schürmann E., Käthlitz W. Äquivalente Wirkung der Legierungselemente auf die konzentrations- und temperaturabhängige Wasserstofflöslichkeit in eisenreichen Drei- und Mehrstoffschmelzen // *Archiv für das Eisenhüttenwesen*. 1981. Vol. 52. No. 8. P. 295–301.
6. Apa L. Solubility of hydrogen in nickel, cobalt and their alloys calculated by the alloying element equivalence method. Comparison with solubility in iron alloys // *Metalurgia (Bucharest)*. 1988. Vol. 40. No. 5. P. 236–242.
7. Бурyleв Б.П. Растворимость водорода в жидких сплавах железа // *Известия вузов. Черная металлургия*. 1965. № 2. С. 17–23.
8. Jiang G.-R., Li Y.-X., Liu Y. Calculation of hydrogen solubility in molten alloys // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2011. Vol. 21. No. 5. P. 1130–1135. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(11\)60832-7](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(11)60832-7)
9. Люпис К. Химическая термодинамика материалов. Москва: Металлургия, 1989. 504 с.
10. Sieverts A. Zur Kenntnis der Okklusion und Diffusion von Gasen durch Metalle // *Zeitschrift für physikalische Chemie*. 1907. Vol. 60. No. 2. P. 129–201. <https://doi.org/10.1515/zpch-1907-6009>
11. Sieverts A. Die Löslichkeit von Wasserstoff in Kupfer, Eisen und Nickel // *Zeitschrift für physikalische Chemie*. 1911. Vol. 77. No. 5. P. 591–613. <https://doi.org/10.1515/zpch-1911-7737>
12. Sieverts A., Zapf G., Moritz H. Die Löslichkeit von Wasserstoff, Deuterium und Stickstoff in Eisen // *Zeitschrift für physikalische Chemie*. 1938. Vol. A183. No. 1. P. 19–37. <https://doi.org/10.1515/zpch-1939-18304>
1. Wagner C. *Thermodynamics of Alloys*. Cambridge: Addison-Wesley Press, 1952, 162 p. (Russ. ed.: Vagner K. *Termodinamika splavov*. Moscow: Metallurgiya, 1957, 179 p.).
2. Langenberg F.C. Predicting solubility of nitrogen in molten steel. *Journal of Metals*. 1956, vol. 8, no. 8, pp. 1099–1101.
3. Bol'shov L.A. On solubility of nitrogen in liquid multicomponent iron alloys with transition metals. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1982, no. 1, pp. 8–10. (In Russ.).
4. Bol'shov L.A. *Statistical theory of multicomponent and low-concentration alloys: Dr. Phys.-Math. Sci. Diss.* Moscow: 1991, 496 p. (In Russ.).
5. Schürmann E., Käthlitz W. Äquivalente Wirkung der Legierungselemente auf die konzentrations- und temperaturabhängige Wasserstofflöslichkeit in eisenreichen Drei- und Mehrstoffschmelzen. *Archiv für das Eisenhüttenwesen*. 1981, vol. 52, no. 8, pp. 295–301. (In Germ.).
6. Apa L. Solubility of hydrogen in nickel, cobalt and their alloys calculated by the alloying element equivalence method. Comparison with solubility in iron alloys. *Metalurgia (Bucharest)*. 1988, vol. 40, no. 5, pp. 236–242. (In Romanian).
7. Burylev B.P. Solubility of hydrogen in liquid iron alloys. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1965, no. 2, pp. 17–23. (In Russ.).
8. Jiang G.-R., Li Y.-X., Liu Y. Calculation of hydrogen solubility in molten alloys. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2011, vol. 21, no. 5, pp. 1130–1135. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(11\)60832-7](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(11)60832-7)
9. Lupis C.H.P. *Chemical Thermodynamics of Materials*. New York: North Holland, 1983, 581 p. (Russ. ed.: Lupis K. *Khimicheskaya termodinamika materialov*. Moscow: Metallurgiya, 1989, 503 p.).
10. Sieverts A. Zur Kenntnis der Okklusion und Diffusion von Gasen durch Metalle. *Zeitschrift für physikalische Chemie*. 1907, vol. 60, no. 2, pp. 129–201. (In Germ.). <https://doi.org/10.1515/zpch-1907-6009>
11. Sieverts A. Die Löslichkeit von Wasserstoff in Kupfer, Eisen und Nickel. *Zeitschrift für physikalische Chemie*. 1911, vol. 77, no. 5, pp. 591–613. (In Germ.). <https://doi.org/10.1515/zpch-1911-7737>
12. Sieverts A., Zapf G., Moritz H. Die Löslichkeit von Wasserstoff, Deuterium und Stickstoff in Eisen. *Zeitschrift für physikalische Chemie*. 1938, vol. A183, no. 1, pp. 19–37. (In Germ.). <https://doi.org/10.1515/zpch-1939-18304>

13. Liang H., Bever M.B., Floe C.F. The solubility of hydrogen in molten iron-silicon alloys // *Transactions of AIME*. 1946. Vol. 167. No. 2. P. 395–403.
14. Карнаухов М.М., Морозов А.Н. Растворимость водорода в жидком железе и его сплавах с титаном, ниобием и танталом // *Известия АН СССР. Отделение технических наук (ОТН)*. 1948. № 12. С. 1845–1855.
15. Busch T., Dodd R.A. The solubility of hydrogen and nitrogen in liquid alloys of iron, nickel and cobalt // *Transactions of the Metallurgical Society of AIME*. 1960. Vol. 218. No. 3. P. 488–491.
16. De Kazinczy F., Lindberg O. Solubility of hydrogen in Fe-Ni and Fe-Cr alloys at 1400 and 1600 °C // *Jernkontorets Annaler*. 1960. Vol. 144. No. 4. P. 288–296.
17. Schenck H., Wunsch H. Über die Gleichgewichtslöslichkeit des Wasserstoffs im flüssigen reinen Nickel und Eisen und die Beeinflussung im Eisen durch Sauerstoff // *Archiv für das Eisenhüttenwesen*. 1961. Vol. 32. No. 11. P. 779–790.
18. Maekawa S., Nakagawa Y. The solubility of hydrogen in liquid iron and iron alloys. Report 1 // *Research Reports of the Japan Steel Works, Ltd.* March 1, 1961, 20 p.
19. Weinstein M., Elliott J.F. Solubility of hydrogen in liquid iron alloys // *Transactions of the Metallurgical Society of AIME*. 1963. Vol. 227. No. 2. P. 382–393.
20. Bagshaw T., Engledow D., Mitchell A. Solubility of hydrogen in some liquid iron-based alloys // *Journal of the Iron and Steel Institute*. 1965. Vol. 203. No. 2. P. 160–165.
21. Schenck H., Lange K.W. Untersuchungen über die Wasserstofflöslichkeit in Fe, Ni, Co, Cu und deren binären Nickellegierungen // *Archiv für das Eisenhüttenwesen*. 1966. Vol. 37. No. 9. P. 738–748.
22. Someno M., Nagasaki K., Kadoi K. Solubility of hydrogen in liquid iron and some binary iron alloys // *Nippon kinzoku gakkai-shi*. 1967. Vol. 31. No. 6. P. 729–734.
23. Gunji K., Matoba S., Ono K. Measurement of hydrogen solubility in liquid iron alloys // *Nippon kinzoku gakkai-shi*. 1967. Vol. 31. No. 1. P. 51–64.
24. Kato E., Fukuda Sh., Sugiyama T., Furukawa T. Solubility of hydrogen in liquid iron alloys // *Tetsu-to-Nagane*. 1970. Vol. 56. No. 5. P. 521–535.
25. Blosssey R.G., Pehlke R.D. Solubility of hydrogen in liquid Fe-Co-Ni alloys // *Metallurgical Transactions*. 1971. Vol. 2. No. 11. P. 3157–3161.
26. Нгуен Нгия, Явоиский В.И., Костерев Л.Б., Афанасьев М.И. Растворимость водорода в бинарных расплавах на основе железа // *Известия АН СССР. Металлы*. 1972. № 4. С. 18–23.
27. Boorstein W.M., Pehlke R.D. Measurement of hydrogen solubility in liquid iron alloys employing a constant volume technique // *Metallurgical Transactions*. 1974. Vol. 5. No. 2. P. 399–405. <https://doi.org/10.1007/BF02644107>
28. Bester H., Lange K.W. Wasserstofflöslichkeit in Eisen und flüssigen Eisen-, Mangan-, Chrom- und Siliziumlegierungen // *Stahl und Eisen*. 1977. Vol. 97. No. 21. P. 1037–1039.
29. Mitra M., Lange K.W. Experimental studies on hydrogen solubility in liquid ternary iron-nickel-chromium alloys // *Steel Research*. 1990. Vol. 61. No. 8. P. 353–358. <https://doi.org/10.1002/srin.199000361>
30. Эллиот Дж.Ф., Глейзер М., Рамакришна В. Термохимия сталеплавления процессов. Москва: Металлургия, 1969. 252 с.
31. Sigworth G.K., Elliott J.F. The thermodynamics of liquid iron alloys // *Metal Science*. 1974. Vol. 8. No. 1. P. 298–310.
32. Григорян В.А., Белянчиков Л.Н., Стомахин А.Я. Теоретические основы электросталеплавления процессов. Москва: Металлургия, 1987. 272 с.
33. Sieverts A., Krumbhaar W. Über die Löslichkeit von Gasen in Metallen und Legierungen // *Berichte der deutschen chemischen Gesellschaft*. 1910. Vol. 43. No. 1. P. 893–900. <https://doi.org/10.1002/cber.191004301152>
13. Liang H., Bever M.B., Floe C.F. The solubility of hydrogen in molten iron-silicon alloys. *Transactions of AIME*. 1946, vol. 167, no. 2, pp. 395–403.
14. Karnaukhov M.M., Morozov A.N. Solubility of hydrogen in liquid iron and its alloys with titanium, niobium and tantalum. *Izvestiya AN SSSR. Otdeleniye tekhnicheskikh nauk (OTN)*. 1948, no. 12, pp. 1845–1855. (In Russ.).
15. Busch T., Dodd R. A. The solubility of hydrogen and nitrogen in liquid alloys of iron, nickel and cobalt. *Transactions of the Metallurgical Society of AIME*. 1960, vol. 218, no. 3, pp. 488–491.
16. De Kazinczy F., Lindberg O. Solubility of hydrogen in Fe-Ni and Fe-Cr alloys at 1400 and 1600 °C. *Jernkontorets Annaler*. 1960, vol. 144, no. 4, pp. 288–296.
17. Schenck H., Wunsch H. Über die Gleichgewichtslöslichkeit des Wasserstoffs im flüssigen reinen Nickel und Eisen und die Beeinflussung im Eisen durch Sauerstoff. *Archiv für das Eisenhüttenwesen*. 1961, vol. 32, no. 11, pp. 779–790. (In Germ.).
18. Maekawa S., Nakagawa Y. The solubility of hydrogen in liquid iron and iron alloys. Report 1. *Research Reports of the Japan Steel Works, Ltd.* March 1, 1961, 20 p.
19. Weinstein M., Elliott J.F. Solubility of hydrogen in liquid iron alloys. *Transactions of the Metallurgical Society of AIME*. 1963, vol. 227, no. 2, pp. 382–393.
20. Bagshaw T., Engledow D., Mitchell A. Solubility of hydrogen in some liquid iron-based alloys. *Journal of the Iron and Steel Institute*. 1965, vol. 203, no. 2, pp. 160–165.
21. Schenck H., Lange K.W. Untersuchungen über die Wasserstofflöslichkeit in Fe, Ni, Co, Cu und deren binären Nickellegierungen. *Archiv für das Eisenhüttenwesen*. 1966, vol. 37, no. 9, pp. 738–748. (In Germ.).
22. Someno M., Nagasaki K., Kadoi K. Solubility of hydrogen in liquid iron and some binary iron alloys. *Nippon kinzoku gakkai-shi*. 1967, vol. 31, no. 6, pp. 729–734. (In Jap.).
23. Gunji K., Matoba S., Ono K. Measurement of hydrogen solubility in liquid iron alloys. *Nippon kinzoku gakkai-shi*. 1967, vol. 31, no. 1, pp. 51–64. (In Jap.).
24. Kato E., Fukuda Sh., Sugiyama T., Furukawa T. Solubility of hydrogen in liquid iron alloys. *Tetsu-to-Hagane*. 1970, vol. 56, no. 5, pp. 521–535. (In Jap.).
25. Blosssey R.G., Pehlke R.D. Solubility of hydrogen in liquid Fe-Co-Ni alloys. *Metallurgical Transactions*. 1971, vol. 2, no. 11, pp. 3157–3161.
26. Nguen Ngia, Yavoiskii V.I., Kosterev L.B., Afanas'ev M.I. Solubility of hydrogen in binary iron-based melts. *Izvestiya AN SSSR. Metallurgy*. 1972, no. 4, pp. 18–23. (In Russ.).
27. Boorstein W.M., Pehlke R.D. Measurement of hydrogen solubility in liquid iron alloys employing a constant volume technique. *Metallurgical Transactions*. 1974, vol. 5, no. 2, pp. 399–405. <https://doi.org/10.1007/BF02644107>
28. Bester H., Lange K.W. Wasserstofflöslichkeit in Eisen und flüssigen Eisen-, Mangan-, Chrom- und Siliziumlegierungen. *Stahl und Eisen*. 1977, vol. 97, no. 21, pp. 1037–1039. (In Germ.).
29. Mitra M., Lange K.W. Experimental studies on hydrogen solubility in liquid ternary iron-nickel-chromium alloys. *Steel Research*. 1990, vol. 61, no. 8, pp. 353–358. <https://doi.org/10.1002/srin.199000361>
30. Elliott J.F., Gleiser M., Ramakrishna V. *Thermochemistry for Steelmaking*. Vol. 2. Reading MA-Palo Alto-London: Addison-Wesley Publ. Co., 1963. (Russ ed.: Elliott J.F., Gleiser M., Ramakrishna V. *Termokhimiya staleplavil'nykh protsessov*. Moscow: Metallurgiya, 1969, 252 p.)
31. Sigworth G.K., Elliott J.F. The thermodynamics of liquid iron alloys. *Metal Science*. 1974, vol. 8, no. 1, pp. 298–310.
32. Grigoryan V.A., Belyanchikov L.N., Stomakhin A.Ya. *Theoretical Fundamentals of Electric Steelmaking Processes*. Moscow: Metallurgiya, 1987, 272 p. (In Russ.).
33. Sieverts A., Krumbhaar W. Über die Löslichkeit von Gasen in Metallen und Legierungen. *Berichte der deutschen chemischen Gesellschaft*. 1910, vol. 43, no. 1, pp. 893–900. (In Germ.). <https://doi.org/10.1002/cber.191004301152>

34. Weinstein M., Elliott J.F. The solubility of hydrogen in liquid pure metals: cobalt, chromium, copper and nickel // Transactions of the Metallurgical Society of AIME. 1963. Vol. 227. No. 1. P. 285–291.
35. Bagshaw T., Mitchell A. Solubility of hydrogen in some alloys of nickel // Journal of the Iron and Steel Institute. 1966. Vol. 204. No. 2. P. 87–90.
36. Lange K.W., Schenck H. Wasserstofflöslichkeit in Ni-Mo und Ni-W Legierungen // Zeitschrift für Metallkunde. 1969. Vol. 60. No. 1. P. 62–68.
37. Линчевский Б.В. Термодинамика и кинетика взаимодействия газов с жидкими металлами. Москва: Металлургия, 1986. 224 с.
38. Emi T., Pehlke R.D. Theoretical calculation of the solubility of hydrogen in liquid metals // Metallurgical Transactions. 1970. Vol. 1. No. 10. P. 2733–2747. <https://doi.org/10.1007/BF03037808>
39. Lupis C.H.P., Elliott J.F. The relation between interaction coefficients ϵ and e // Transactions of the Metallurgical Society of AIME. 1965. Vol. 233. No. 1. P. 257–258.
40. Большов Л.А., Корнейчук С.К. Термодинамика жидких растворов азота в хроме // Известия вузов. Черная металлургия. 2019. Т. 62. № 5. С. 387–393. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-5-387-393>
41. Gunji K., Ono K., Aoki Y. The effect of various elements on the solubility of hydrogen in liquid iron // Nippon kinzoku gakkishi. 1964. Vol. 28. No. 1. P. 64–68.
42. Большов Л.А. Термодинамика растворов водорода в жидких сплавах железа с переходными металлами // Журнал физической химии. 1997. Т. 71. №. 10. С. 1902–1903.
43. Большов Л.А., Корнейчук С.К., Большова Э.Л. Термодинамика растворов азота в жидком никеле // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 3. С. 200–204. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-3-200-204>
44. Hultgren R., Desai P.D., Hawkins D.T., Gleiser M., Kelley K.K. Selected values of thermodynamic properties of binary alloys. Metals Park, Ohio: ASFM, 1973. 1435 p.
45. Большов Л.А., Корнейчук С.К. Значения термодинамических параметров взаимодействия в жидких бинарных сплавах // Известия вузов. Черная металлургия. 2019. Т. 62. № 9. С. 713–718. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-9-713-718>
46. Hardy H.K. A “subregular” solution model and its application to some binary alloy systems // Acta Metallurgica. 1953. Vol. 1. No. 1. P. 202–210.
34. Weinstein M., Elliott J.F. The solubility of hydrogen in liquid pure metals: cobalt, chromium, copper and nickel. *Transactions of the Metallurgical Society of AIME*. 1963, vol. 227, no. 1, pp. 285–291.
35. Bagshaw T., Mitchell A. Solubility of hydrogen in some alloys of nickel. *Journal of the Iron and Steel Institute*. 1966, vol. 204, no. 2, pp. 87–90.
36. Lange K.W., Schenck H. Wasserstofflöslichkeit in Ni-Mo- und Ni-W-Legierungen. *Zeitschrift für Metallkunde*. 1969, vol. 60, no. 1, pp. 62–68. (In Germ.).
37. Linchevskii B.V. *Thermodynamics and Kinetics of Interaction of Gases with Liquid Metals*. Moscow: Metallurgiya. 1986, 224 p. (In Russ.).
38. Emi T., Pehlke R.D. Theoretical calculation of the solubility of hydrogen in liquid metals. *Metallurgical Transactions*. 1970, vol. 1, no. 10, pp. 2733–2747. <https://doi.org/10.1007/BF03037808>
39. Lupis C.H.P., Elliott J.F. The relation between interaction coefficients ϵ and e . *Transactions of the Metallurgical Society of AIME*. 1965, vol. 233, no. 1, pp. 257–258.
40. Bol'shov L.A., Korneichuk S.K. Thermodynamics of liquid nitrogen solutions in chromium. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2019, vol. 62, no. 5, pp. 387–393. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-5-387-393>
41. Gunji K., Ono K., Aoki Y. The effect of various elements on the solubility of hydrogen in liquid iron. *Nippon kinzoku gakkishi*. 1964, vol. 28, no. 1, pp. 64–68. (In Jap.).
42. Bol'shov L.A. Thermodynamics of solutions of hydrogen in liquid alloys of iron with transition metals. *Zhurnal fizicheskoi khimii*. 1997, vol. 71, no. 10, pp. 1902–1903. (In Russ.).
43. Bol'shov L.A., Korneichuk S.K., Bol'shova E.L. Thermodynamics of nitrogen solutions in liquid nickel. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 3, pp. 200–204. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-3-200-204>
44. Hultgren R., Desai P.D., Hawkins D.T., Gleiser M., Kelley K.K. *Selected Values of Thermodynamic Properties of Binary Alloys*. Metals Park, Ohio: ASFM, 1973, 1435 p.
45. Bol'shov L.A., Korneichuk S.K. Thermodynamic interaction coefficients in low-concentrated liquid binary alloys. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2019, vol. 62, no. 9, pp. 713–718. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-9-713-718>
46. Hardy H.K. A “subregular” solution model and its application to some binary alloy systems. *Acta Metallurgica*. 1953, vol. 1, no. 1, pp. 202–210.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Леонид Абрамович Большов, д.ф.-м.н., профессор кафедры математики и информатики, Вологодский государственный университет
E-mail: labolshov@mail.ru

Leonid A. Bol'shov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof. of the Chair of Mathematics and Informatics, Vologda State University
E-mail: labolshov@mail.ru

Светлана Константиновна Корнейчук, к.ф.-м.н., доцент кафедры физики, Вологодский государственный университет
E-mail: korn62@mail.ru

Svetlana K. Korneichuk, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assist. Prof. of the Chair of Physics, Vologda State University
E-mail: korn62@mail.ru

Элина Леонидовна Большова, доцент кафедры английского языка, Вологодский государственный университет
E-mail: labolshov@mail.ru

Elina L. Bol'shova, Assist. Prof. of the Chair of English, Vologda State University
E-mail: labolshov@mail.ru

Вклад авторов

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Л. А. Большов – идея и текст статьи.

L. A. Bol'shov – formation of the article idea, writing the text.

С. К. Корнейчук – анализ метода и результатов, оформление текста и сопровождающих документов.

S. K. Korneichuk – analysis of the method and results, revising the text and accompanying documents.

Э. Л. Большова – перевод на русский язык англоязычных статей, перевод на английский язык аннотации и библиографического списка.

E. L. Bol'shova – translation of English articles, translation into English of annotation and references.

Поступила в редакцию 28.01.2022

Received 28.01.2022

После доработки 19.04.2022

Revised 19.04.2022

Принята к публикации 25.04.2022

Accepted 25.04.2022