



Оригинальная статья  
УДК 669:544.35:546.17:546.74  
DOI 10.17073/0368-0797-2021-3-200-204



## ТЕРМОДИНАМИКА РАСТВОРОВ АЗОТА В ЖИДКОМ НИКЕЛЕ

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

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

**Аннотация.** К растворам азота в жидких сплавах системы Fe–Ni применена простейшая модель структуры и межатомного взаимодействия, которая ранее использована авторами для растворов азота в сплавах системы Fe–Cr. К этой модели применены принципы статистической механики. Таким образом получены три формулы. Первая формула выражает константу закона Сивертса для растворимости азота в жидком никеле через аналогичную константу для растворимости азота в жидком железе и вагнеровский параметр взаимодействия азота с никелем в малоцентрированных жидких сплавах на основе железа. Вторая формула выражает парциальную энтальпию растворения азота в жидком никеле при образовании бесконечно разбавленного раствора через аналогичную величину для растворения азота в жидком железе и вагнеровский параметр взаимодействия азота с никелем в жидких сплавах на основе железа. Третья формула выражает вагнеровский параметр взаимодействия азота с железом в жидких сплавах на основе никеля через вагнеровский параметр взаимодействия азота с никелем в жидких сплавах на основе железа. В качестве исходных для расчета по этим формулам приняты следующие величины. Константа закона Сивертса для растворимости азота в жидком железе при абсолютной температуре  $T = 1873$  К принята равной 0,044 % (по массе). Парциальная энтальпия растворения азота в жидком железе принята равной 5,0 кДж/моль. Для вагнеровского параметра взаимодействия азота с никелем в жидких сплавах на основе железа при  $T = 1873$  К исследованы три варианта значений: 2,4; 2,6; 2,85. Для первого варианта получены теоретическое значение константы закона Сивертса для растворимости азота в жидком никеле при  $T = 1873$  К, равное 0,00195 % (по массе); теоретическое значение энтальпии растворения азота в жидком никеле, равное 52,7 кДж/моль; теоретическое значение вагнеровского параметра взаимодействия азота с железом в жидких сплавах на основе никеля, равное –4,0. Согласие теории с экспериментом представляется удовлетворительным.

**Ключевые слова:** термодинамика, статистическая механика, растворы, азот, никель, железо, коэффициент активности, энтальпия, вагнеровский параметр взаимодействия, закон Сивертса

**Для цитирования:** 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>

Original article

## THERMODYNAMICS OF NITROGEN SOLUTIONS IN LIQUID NICKEL

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 nitrogen solutions in liquid alloys of Fe–Ni system, which earlier (2019) was used by the authors for nitrogen solutions in alloys of Fe–Cr system. The principles of statistical mechanics are used in this model. Thus, three formulas were obtained. The first formula expresses the Sieverts law constant for the solubility of nitrogen in liquid nickel through a similar constant for the solubility of nitrogen in liquid iron and the Wagner interaction coefficient of nitrogen with nickel in low-concentration liquid iron-base alloys. The second formula expresses the partial enthalpy of dissolution of nitrogen in liquid nickel during the formation of an infinitely dilute solution through a similar value for dissolution of nitrogen in liquid iron and the Wagner interaction coefficient of nitrogen with nickel in iron-base liquid alloys. The third formula expresses the Wagner interaction coefficient of nitrogen with iron in low-concentration liquid nickel-base alloys through the Wagner interaction coefficient of nitrogen with nickel in liquid iron-base alloys. The constant of the Sieverts law for the solubility of nitrogen in liquid iron at  $T = 1873$  K is assumed to be 0.044 mass. %. The partial enthalpy of dissolution of nitrogen in liquid iron assumed to be 5.0 kJ/mol. For Wagner interaction coefficient of nitrogen with nickel in iron-base liquid alloys at 1873 K three variants of values were studied: 2.4, 2.6, and 2.85. For the first option, theoretical value of the Sieverts law constant for solubility of nitrogen in liquid nickel at  $T = 1873$  K, equal to 0.00195 mass. % was obtained. Theoretical value of the enthalpy of dissolution of nitrogen in liquid nickel is 52.7 kJ/mol. Theoretical value of the Wagner interaction coefficient of nitrogen with iron in nickel-base liquid alloys is –4.0. The agreement of theory with experiment seems to be satisfactory.

**Keywords:** thermodynamics, statistical mechanics, solutions, nitrogen, nickel, iron, activity coefficient, enthalpy, Wagner interaction coefficient, Sieverts law

**For citation:** 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>

Никель был открыт в 1751 г. [1] шведским минералогом Кронстедом [2]. Этот элемент играет важную роль в современной технологии. Мировая добыча никеля в 2018 г. оценивалась в 2,3 млн т [3]. Приблизительно 68 % добываемого никеля используется в виде ферроникеля для легирования нержавеющей сталей. Примерно 10 % добываемого никеля приходится на производство известных сплавов (монель-металл, белое золото, нихром, пермаллой, инвар, константан, никелин, марганин). Около 9 % никеля расходуется в качестве гальванических покрытий. Соединения никеля используются в качестве катализаторов, пигментов и химических реактивов [2]. Никель является основой многих жаропрочных [4, 5] и коррозионноустойчивых сплавов. Эти сплавы применяются в энергетике, химической промышленности [6], в самолетостроении и ракетостроении. В частности, из них отливаются лопатки газовых турбин. На эксплуатационные свойства жаропрочных сплавов существенное влияние оказывает содержание в них азота [7]. Экспериментальному изучению растворимости азота в жидком никеле уделялось большое внимание, начиная с 1959 г. Заметим, что еще в середине прошлого века существовало мнение, что растворимость азота из газовой фазы в жидком никеле практически отсутствует.

Растворимость азота в жидком никеле [% Ni]\*, выраженная в % (по массе), при парциальном давлении азота в газовой фазе  $P_{N_2}$  подчиняется закону Сиверта [8], который запишем в виде [9]

$$[\% \text{ Ni}]^* = K' \sqrt{\frac{P_{N_2}}{P_0}},$$

где  $P_0$  – стандартное давление ( $P_0 = 1 \text{ атм} \approx 0,101 \text{ МПа}$ );  $K'(\text{Ni})$  – константа закона Сиверта для растворимости азота в жидком никеле ( $K'(\text{Ni}) = [\% \text{ Ni}]^*$  при  $P_{N_2} = P_0$ ).

Справедливость закона Сиверта для растворимости азота в жидком никеле при абсолютной температуре 1823 К вплоть до  $P_{N_2} = 46 P_0$  экспериментально проверена в работе [6]. Экспериментальные значения величин  $K'(\text{Ni})$  при  $T = 1873 \text{ К}$ , полученные различными исследователями с использованием разных методов измерения растворимости азота в жидком никеле с 1959 по 2019 г., показаны в таблице. Этим данным отвечает оценка  $K'(\text{Ni}) = 0,0015 \pm 0,0006 \%$  (по массе), где последний член приблизительно отвечает среднему квадратичному отклонению. Из данных таблицы видно, что результаты последних исследований согласуются с результатами, полученными на начальном этапе.

В ряде экспериментальных исследований был оценен температурный коэффициент растворимости азота в жидком никеле. Как известно, температурная зависимость константы равновесия химической реакции определяется уравнением Вант-Гоффа. Таким образом, зная

температурный коэффициент растворимости азота, можно оценить значение парциальной энтальпии растворения азота в жидком никеле  $\Delta H_N^0(\text{Ni})$  при образовании бесконечно разбавленного раствора. В работе [10] приведены оценки величины  $\Delta H_N^0(\text{Ni})$  по данным работ [10, 14, 15]. Эти оценки равны 17,7; 65,2; 28,0 кДж/моль соответственно. Как видно, из эксперимента надежно определяется лишь знак  $\Delta H_N^0(\text{Ni})$ .

Рассмотрим трехкомпонентные растворы системы Fe–Ni–N. Пусть  $c_{\text{Fe}}$ ,  $c_{\text{Ni}}$  и  $c_{\text{N}}$  – концентрации соответствующих компонентов, выраженные в мольных долях;  $a_{\text{N}}$  – термодинамическая активность азота в растворе;  $\gamma_{\text{N}} = \frac{a_{\text{N}}}{c_{\text{N}}}$  – рациональный коэффициент активности азота в растворе.

Введем вагнеровские [20] параметры взаимодействия  $\varepsilon_{\text{N}}^{\text{Ni}}(\text{Fe})$  и  $\varepsilon_{\text{N}}^{\text{Fe}}(\text{Ni})$ :

$$\varepsilon_{\text{N}}^{\text{Ni}}(\text{Fe}) = \frac{\partial \ln \gamma_{\text{N}}}{\partial c_{\text{Ni}}} \text{ при } c_{\text{Fe}} \rightarrow 1;$$

$$\varepsilon_{\text{N}}^{\text{Fe}}(\text{Ni}) = \frac{\partial \ln \gamma_{\text{N}}}{\partial c_{\text{Fe}}} \text{ при } c_{\text{Ni}} \rightarrow 1,$$

где  $\varepsilon_{\text{N}}^{\text{Ni}}(\text{Fe})$  – параметр взаимодействия азота с никелем в сплавах на основе железа;  $\varepsilon_{\text{N}}^{\text{Fe}}(\text{Ni})$  – параметр взаимодействия азота с железом в сплавах на основе никеля.

В работе [21] растворимость азота в жидких сплавах системы Ni–Fe измерялась методом Сиверта [8]. На основании этих исследований легко оценить:  $\varepsilon_{\text{N}}^{\text{Fe}}(\text{Ni}) = -3,1$  при  $T = 1873 \text{ К}$ .

В работе [6] аналогичные исследования проводились методом закалки образцов. В результате имеем оценку:  $\varepsilon_{\text{N}}^{\text{Fe}}(\text{Ni}) = -3,5$  при  $T = 1823 \text{ К}$ .

#### Значения константы закона Сиверта $K'(\text{Ni})$ для растворимости азота в жидком никеле при $T = 1873 \text{ К}$

#### Values of the Sieverts law $K'(\text{Ni})$ constant for the solubility of nitrogen in liquid nickel at $T = 1873 \text{ К}$

$K'(\text{Ni})$ , % (по массе)	Источник	Метод исследования
0,0025	[11]	Метод Сиверта
0,0005 – 0,00121	[12]	Метод Сиверта
0,00126	[13]	Метод Сиверта
0,0015	[14]	Метод Сиверта
0,0013	[15]	Левитационное плавление
0,00144	[16]	Закалка образцов
0,0013 – 0,0035	[17]	Закалка образцов
0,0013	[18]	Метод Сиверта
0,0020 ± 0,0002	[10]	Метод Сиверта
0,0009*	[6]	Закалка образцов
0,0015	[19]	Закалка образцов

\* Данные для  $T = 1823 \text{ К}$

Первоначально параметр взаимодействия  $\varepsilon_N^{\text{Fe}}(\text{Ni})$  был оценен по данным исследования [12] для  $T = 1873 \text{ K}$ :  $\varepsilon_N^{\text{Fe}}(\text{Ni}) = -3,2$ . Старые и более новые результаты при этом хорошо согласуются друг с другом.

В работе [9] представлена модельная теория взаимодействия в жидких растворах системы Fe–Cr–N и получены формулы, связывающие термодинамические свойства растворов азота в жидком хrome и в жидком железе. Аналогичную теорию применим к системе Fe–Ni–N. Тогда получим:

$$K'(\text{Ni}) = K'(\text{Fe}) \frac{A_{\text{Fe}}}{A_{\text{Ni}}} \left[ 1 - \frac{1}{6} \varepsilon_N^{\text{Ni}}(\text{Fe}) \right]^6, \quad (1)$$

где  $K'(\text{Fe})$  – константа закона Сивертса для растворимости азота в жидком железе;  $A_{\text{Fe}}$  – атомная масса железа;  $A_{\text{Ni}}$  – атомная масса никеля;

$$\Delta H_N^0(\text{Ni}) = \Delta H_N^0(\text{Fe}) - 6RT \ln \left[ 1 - \frac{1}{6} \varepsilon_N^{\text{Ni}}(\text{Fe}) \right], \quad (2)$$

где  $\Delta H_N^0(\text{Fe})$  – парциальная энтальпия растворения азота в жидком железе при образовании бесконечно разбавленного раствора;  $R$  – универсальная газовая постоянная;

$$\varepsilon_N^{\text{Fe}}(\text{Ni}) = \frac{-6\varepsilon_N^{\text{Ni}}(\text{Fe})}{6 - \varepsilon_N^{\text{Ni}}(\text{Fe})}. \quad (3)$$

В работе [9] принято значение  $K'(\text{Fe}) = 0,044 \%$  (по массе) при  $T = 1873 \text{ K}$  согласно экспериментальному исследованию [22] и монографии [23]. Также было принято значение  $\Delta H_N^0(\text{Fe}) = 5,0 \text{ кДж/моль}$ . Эти значения принимаем и в настоящей работе.

Наиболее известное значение вагнеровского параметра  $\varepsilon_N^{\text{Ni}}(\text{Fe})$  при  $T = 1873 \text{ K}$  составляет величину 2,4. Этому соответствует значение лангенберговского параметра взаимодействия азота с никелем в сплавах на основе железа  $e_N^{\text{Ni}}(\text{Fe}) = 0,010$  [24]. Если принять упомянутые значения для расчетов по формулам (1)–(3), то получим:  $K'(\text{Ni}) = 0,00195 \%$  (по массе);  $\Delta H_N^0(\text{Ni}) = 52,7 \text{ кДж/моль}$ ;  $\varepsilon_N^{\text{Fe}}(\text{Ni}) = -4,0$ . Расчетное значение  $K'(\text{Ni})$  хорошо согласуется с данными эксперимента [10]. Расчетное значение  $\Delta H_N^0(\text{Ni})$  ближе всего к данным [14]. Расчетное значение  $\varepsilon_N^{\text{Fe}}(\text{Ni})$  совпадает по знаку и порядку величины с данными [6].

Физическая величина, возможные значения которой принадлежат непрерывному промежутку, не может быть измерена абсолютно точно. Всегда есть какая-то экспериментальная неопределенность. Это относится и к термодинамическим параметрам взаимодействия, что необходимо учитывать при верификации рассматриваемой в настоящей работе теории. В частности, в ряде работ [22, 25] получены экспериментальные значения лангенберговского параметра взаимодействия при  $T = 1873 \text{ K}$  в сплавах на основе железа  $e_N^{\text{Ni}}(\text{Fe}) = 0,011$ . Согласно формуле, выведен-

ной в работе [26], этому значению отвечает значение вагнеровского параметра взаимодействия  $\varepsilon_N^{\text{Ni}}(\text{Fe}) = 2,6$ . Подстановка последнего в формулу (1) приводит к расчетному значению  $K'(\text{Ni}) = 0,0014 \%$  (по массе) при  $T = 1873 \text{ K}$ , что очень близко к среднему для экспериментальных значений, указанных в таблице, а также к экспериментальным данным [13–16, 18, 19]. Подстановка значения  $\varepsilon_N^{\text{Ni}}(\text{Fe}) = 2,6$  в формулу (2) дает значение  $\Delta H_N^0(\text{Ni}) = 58,1 \text{ кДж/моль}$ , что довольно близко к экспериментальному значению [14].

Иногда [27] упоминается экспериментальное значение лангенберговского параметра взаимодействия  $e_N^{\text{Ni}}(\text{Fe}) = 0,012$  [28] при  $1873 \text{ K}$ , что соответствует значению вагнеровского параметра взаимодействия  $\varepsilon_N^{\text{Ni}}(\text{Fe}) = 2,85$ . Подстановка этого значения в формулу (1) приводит к теоретической величине  $K'(\text{Ni}) = 0,009 \%$  (по массе) для  $T = 1873 \text{ K}$ , что согласуется с экспериментальными данными [6] для  $T = 1823 \text{ K}$ .

Общий вывод состоит в том, что предлагаемая теория приблизительно согласуется с экспериментом по термодинамике растворов азота в жидком никеле.

В заключение отметим следующий момент, касающийся вывода формул типа (1)–(3). Первоначально такие формулы были выведены для растворов азота в жидком хrome [9]. Этот вывод основывался на допущении идеальности растворов системы Fe–Cr. Рассмотрим малоцентрированный бинарный раствор примеси 2 в растворителе 1. Пусть  $c$  – концентрация примеси, выраженная в мольных долях;  $a_2$  – термодинамическая активность примеси;  $\gamma_2 = \frac{a_2}{c}$  – рациональный коэффициент активности примеси. Вагнеровский параметр взаимодействия  $\varepsilon_2^{(2)}$  в бинарном растворе определяется формулой

$$\varepsilon_2^{(2)} = \frac{\partial \ln \gamma_2}{\partial c} \text{ при } c \rightarrow 0.$$

Для системы Fe–Cr этот параметр обозначим  $\varepsilon_{\text{Cr}}^{\text{Cr}}$ , для системы Fe–Ni – как  $\varepsilon_{\text{Ni}}^{\text{Ni}}$ . Значение параметра  $\varepsilon_2^{(2)}$  характеризует отклонения от закона Генри в растворе при малой концентрации примеси. Данные по термодинамике жидких растворов систем Fe–Cr и Fe–Ni при  $T = 1873 \text{ K}$  имеются в справочнике [29].

По данным [29] в работе [30] методом численного дифференцирования оценены значения вагнеровских параметров взаимодействия  $\varepsilon_{\text{Cr}}^{\text{Cr}}$  и  $\varepsilon_{\text{Ni}}^{\text{Ni}}$  в жидких сплавах на основе железа при  $T = 1873 \text{ K}$ :  $\varepsilon_{\text{Cr}}^{\text{Cr}} = -0,4$ ;  $\varepsilon_{\text{Ni}}^{\text{Ni}} = 1,7$ . Очевидно, что для растворов Fe–Ni отклонения от идеальности значительно больше, чем для растворов Fe–Cr. Поэтому допущение об идеальности растворов Fe–Ni можно считать существенной натяжкой.

Однако при более внимательном рассмотрении легко заметить, что при выводе формул (1)–(3) в работе [9] опирались на результат [31], где была важна не идеальность бинарного раствора системы 1–2, а отсутствие

корреляции между распределением атомов металлов по узлам решетки. Следствием этого является равенство нулю избыточной энтропии раствора. Следовательно, требование идеальности бинарного раствора системы  $I-2$  может быть заменено требованием регулярности или субрегулярности. Таким образом, для обоснования формул (1) – (3) достаточно предположить регулярность или субрегулярность жидких растворов системы Fe–Ni.

## Выводы

В настоящей работе предложена теория, которая приблизительно согласуется с данными эксперимента по термодинамике растворов азота в жидком никеле.

Для обоснования формул (1) – (3) достаточно предположить регулярность или субрегулярность растворов системы Fe–Ni.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

## REFERENCES

1. Некрасов Б.В. Основы общей химии. Т. 2. М.: Химия, 1973. 688 с.
2. Wikipedia. Nickel [Electronic resource]. Available at URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Nickel> (Accessed 08.30.2020).
3. Garside M. Nickel – Statistics and Facts. [Electronic resource]. Available at URL: <https://statista.com/topics/1572/nickel> (Accessed 08.30.2020).
4. Химушин Ф.Ф. Жаропрочные стали и сплавы. М.: Металлургия, 1969. 752 с.
5. Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов / П.Е. Шалин, И.Л. Светлов, Е.Б. Качанов, В.Н. Толорайя, О.С. Гаврилин. М.: Машиностроение, 1997. 336 с.
6. Kowanda C., Speidel M.O. Solubility of nitrogen in liquid nickel and binary Ni – Xi alloys (Xi = Cr, Mo, W, Mn, Fe, Co) under elevated pressure // Scripta Materialia. 2003. Vol. 48. No. 8. P. 1073–1078. [https://doi.org/10.1016/S1359-6462\(02\)00628-0](https://doi.org/10.1016/S1359-6462(02)00628-0)
7. Каблов Д.Е., Чабина Е.Б., Сидоров В.В., Мин П.Г. Исследование влияния азота на структуру и свойства монокристаллов жаропрочного никелевого сплава ЖС30-ВИ // Металловедение и термическая обработка металлов. 2013. № 8. С. 3–7.
8. Sieverts A. Zur Kenntnis der Okklusion und Diffusion von Gasen durch Metalle // Zeitschrift für physikalische Chemie. 1907. Vol. 60U. No. 1. P. 129–201. <https://doi.org/10.1515/zpch-1907-6009>
9. Большов Л.А., Корнейчук С.К. Термодинамика жидких растворов азота в хrome // Известия вузов. Черная металлургия. 2019. Т. 62. № 5. С. 387–393. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-5-387-393>
10. Abdulrahman R.F., Hendry A. The solubility of nitrogen in liquid pure nickel // Metallurgical and Materials Transactions B. 2001. Vol. 32. No. 6. P. 1095–1101. <http://doi.org/10.1007/s11663-001-0097-4>
11. Schenck H., Froberg M.G., Graf H. Untersuchungen über die Beeinflussung der Gleichgewichte von Stickstoff mit flüssigen Eisenlösungen durch den Zusatz weiterer Elemente (II) // Archiv für das Eisenhüttenwesen. 1959. Vol. 30. No. 9. P. 533–537.
12. Humbert J.C., Elliott J.F. The solubility of nitrogen in liquid Fe–Cr–Ni alloys // Transactions of the Metallurgical Society of AIME. 1960. Vol. 218. No. 10. P. 1076–1088.
13. Стомахин А.Я., Байер П., Поляков А.Ю. Растворимость азота в жидком никеле и в сплавах никеля с хромом, молибденом и вольфрамом // Известия АН СССР. Металлы. 1965. № 4. С. 37–45.
14. Федорченко В.И., Аверин В.В., Самарин А.М. Растворимость азота в жидком никеле и расплавах Ni–Cr, Ni–Mo и Ni–W // Доклады Академии наук СССР. 1968. Т. 183. № 4. С. 894–896.
15. Wada H., Gunji K., Wada T. Solubility of nitrogen in molten Fe–Ni and Fe–Cr alloys // Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan. 1968. Vol. 8. No. 10. P. 329–336.
16. Lange K.W., Schenck H. Gas solubility measurements and derivation of inherent thermodynamic information // Metallurgical Transactions. 1970. Vol. 1. No. 7. P. 2036–2038.
17. Kojima Ya., Inouye M., Yamada Yu. Solubility and diffusivity of nitrogen in liquid iron-nickel and iron-cobalt alloys at 1600 °C // Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan. 1975. Vol. 15. No. 12. P. 599–605.
1. Nekrasov B.V. *Fundamentals of General Chemistry*. Vol. 2. Moscow: Khimiya, 1973, 688 p. (In Russ.).
2. Wikipedia. Nickel. [Electronic resource]. Available at URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Nickel> (Accessed 08.30.2020).
3. Garside M. *Nickel – Statistics and Facts*. [Electronic resource]. Available at URL: <https://statista.com/topics/1572/nickel> (Accessed 08.30.2020).
4. Khimushin F.F. *Heat Resistant Steels and Alloys*. Moscow: Metallurgiya, 1969, 752p. (In Russ.).
5. Shalin R.E., Svetlov I.L., Kachanov E.B., Toloraiya V.N., Gavrilin O.S. *Single Crystals of Heat-Resistant Nickel Alloys*. Moscow: Mashinostroenie, 1997, 336 p. (In Russ.).
6. Kowanda C., Speidel M.O. Solubility of nitrogen in liquid nickel and binary Ni–Xi alloys (Xi = Cr, Mo, W, Mn, Fe, Co) under elevated pressure. *Scripta Materialia*. 2003, vol. 48, no. 8, pp. 1073–1078. [https://doi.org/10.1016/S1359-6462\(02\)00628-0](https://doi.org/10.1016/S1359-6462(02)00628-0)
7. Kablov D.E., Chabina E.B., Sidorov V.V., Min P.G. A study of the effect of nitrogen on the structure and properties of single crystals of castable refractory alloy ZhS30-VI. *Metal Science and Heat Treatment*. 2013, vol. 55, no. 7-8, pp. 399–402. <http://doi.org/10.1007/s11041-013-9643-3>
8. Sieverts A. Zur Kenntnis der Okklusion und Diffusion von Gasen durch Metalle. *Zeitschrift für physikalische Chemie*. 1907, vol. 60U, no. 1, pp. 129–201. (In Germ.). <https://doi.org/10.1515/zpch-1907-6009>
9. 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>
10. Abdulrahman R.F., Hendry A. The solubility of nitrogen in liquid pure nickel. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2001, vol. 32, no. 6, pp. 1095–1101. <http://doi.org/10.1007/s11663-001-0097-4>
11. Schenck H., Froberg M.G., Graf H. Untersuchungen über die Beeinflussung der Gleichgewichte von Stickstoff mit flüssigen Eisenlösungen durch den Zusatz weiterer Elemente (II). *Archiv für das Eisenhüttenwesen*. 1959, vol. 30, no. 9, pp. 533–537. (In Germ.).
12. Humbert J.C., Elliott J.F. The solubility of nitrogen in liquid Fe–Cr–Ni alloys. *Transactions of the Metallurgical Society of AIME*. 1960, vol. 218, no. 10, pp. 1076–1088.
13. Stomakhin A.Ya., Baier P., Polyakov A.Yu. Solubility of nitrogen in liquid nickel and nickel alloys with chromium, molybdenum and tungsten. *Izvestiya AN SSSR. Metallurgy*. 1965, no. 4, pp. 37–45. (In Russ.).
14. Fedorchenko V.I., Averin V.V., Samarin A.M. Solubility of nitrogen in liquid nickel and Ni–Cr, Ni–Mo and Ni–W melts. *Doklady Akademii nauk SSSR*. 1968, vol. 183, no. 4, pp. 894–896. (In Russ.).
15. Wada H., Gunji K., Wada T. Solubility of nitrogen in molten Fe–Ni and Fe–Cr alloys. *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan*. 1968, vol. 8, no. 10, pp. 329–336.
16. Lange K.W., Schenck H. Gas solubility measurements and derivation of inherent thermodynamic information. *Metallurgical Transactions*. 1970, vol. 1, no. 7, pp. 2036–2038.
17. Kojima Ya., Inouye M., Yamada Yu. Solubility and diffusivity of nitrogen in liquid iron-nickel and iron-cobalt alloys at 1600 °C. *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan*. 1975, vol. 15, no. 12, pp. 599–605.

18. Wada H., Pehlke R.D. Solubility of nitrogen in liquid Fe–Cr–Ni alloys containing manganese and molybdenum // *Metallurgical and Materials Transactions B*. 1977. Vol. 8B. No. 4. P. 675–682. <http://doi.org/10.1007/BF02658639>
19. Qian K., Zhao P., Zhang M., Lin K. Solubility of nitrogen in liquid Ni, Ni–Nb, Ni–Cr–Nb, Ni–Fe–Nb and Ni–Cr–Fe–Nb systems // *ISIJ International*. 2019. Vol. 59. No. 12. P. 2220–2227. <http://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2019-187>
20. Вагнер К. Термодинамика сплавов. М.: Metallurgizdat, 1957. 179 с.
21. Abdulrahman R.F., Hendry A. Solubility of nitrogen in liquid nickel-based alloys // *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2001. Vol. 32. No. 6. P. 1103–1112. <http://doi.org/10.1007/s11663-001-0098-3>
22. Turnock H.H., Penlke R.D. The solubility of nitrogen in multicomponent liquid iron alloys // *Transactions of the Metallurgical Society of AIME*. 1966. Vol. 236. No. 11. P. 1540–1547.
23. Григорян В.А., Белянчиков Л.Н., Стомахин А.Я. Теоретические основы электросталеплавильных процессов. М.: Metallurgiya, 1987. 272 с.
24. Физико-химические расчеты электросталеплавильных процессов / В.А. Григорян, А.Я. Стомахин, Ю.И. Уточкин, А.Г. Пономаренко, Л.Н. Белянчиков, Г.И. Котельников, О.И. Островский. М.: МИСиС, 2007. 318 с.
25. Ishii F., Ban-ya Sh., Fuwa T. Solubility of nitrogen in liquid iron alloys // *Tetsu-to-Hagane*. 1982. Vol. 68. No. 10. P. 1560–1568. [http://doi.org/10.2355/tetsutohagane1955.68.10\\_1551](http://doi.org/10.2355/tetsutohagane1955.68.10_1551)
26. Lupis C.H.P., Elliott J.F. The relation between interaction coefficients  $\epsilon$  and  $e$  // *Transactions of the Metallurgical Society of AIME*. 1965. Vol. 233. No. 1. P. 257–258.
27. Лысенкова Е.В. Повышение точности расчетов растворимости азота и нитрида титана в сплавах на основе железа. Применение к сталям, легированным азотом и титаном: Дисс. ... канд. техн. наук. М.: МИСиС, 2015. 75 с.
28. Pak J.-J., Jeong Jo.-S., Tae S.-J., Kim D.S., Lee J.Yo. Thermodynamics of titanium and nitrogen in an Fe–Ni melt // *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2005. Vol. 36. No. 4. P. 489–493. <http://doi.org/10.1007/s11663-005-0040-1>
29. Hultgren R., Desai P.D., Hawkins D.T. etc. *Selected Values of Thermodynamic Properties of Binary Alloys*. Metals Park, Ohio: ASFM, 1973. 1435 p.
30. Большов Л.А., Корнейчук С.К. Значения термодинамических параметров взаимодействия в малоконцентрированных жидких бинарных сплавах // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2019. Т. 62. № 9. С. 713–718. <http://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-9-713-718>
31. Большов Л.А. Статистическая теория многокомпонентных и малоконцентрированных сплавов. Дисс. ... докт. физ.-мат. наук. М.: МГУ, 1991. 496 с.
18. Wada H., Pehlke R.D. Solubility of nitrogen in liquid Fe–Cr–Ni alloys containing manganese and molybdenum. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 1977, vol. 8, no. 4, pp. 675–682. <http://doi.org/10.1007/BF02658639>
19. Qian K., Zhao P., Zhang M., Lin K. Solubility of nitrogen in liquid Ni, Ni–Nb, Ni–Cr–Nb, Ni–Fe–Nb and Ni–Cr–Fe–Nb systems. *ISIJ International*. 2019, vol. 59, no. 12, pp. 2220–2227. <http://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2019-187>
20. Wagner Carl. *Thermodynamics of Alloys*. Cambridge: Addison-Wesley Press, 1952, 162 p. (Russ. ed.: Wagner C. *Termodinamika spлавov*. Moscow: Metallurgizdat, 1957, 179 p.)
21. Abdulrahman R.F., Hendry A. Solubility of nitrogen in liquid nickel-based alloys. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2001, vol. 32, no. 6, pp. 1103–1112. <http://doi.org/10.1007/s11663-001-0098-3>
22. Turnock H.H., Penlke R.D. The solubility of nitrogen in multicomponent liquid iron alloys. *Transactions of the Metallurgical Society of AIME*. 1966, vol. 236, no. 11, pp. 1540–1547.
23. Grigoryan V.A., Belyanchikov L.N., Stomakhin A.Ya. *Theoretical Fundamentals of Electric Steelmaking Processes*. Moscow: Metallurgiya, 1987, 272 p. (In Russ.)
24. Grigoryan V.A., Stomakhin A.Ya., Utochkin Yu.I., Ponomarenko A.G., Belyanchikov L.N., Kotelnikov G.I., Ostrovskii O.I. *Physico-Chemical Calculations of Electric Steelmaking Processes*. Moscow: MISIS, 2007, 318 p. (In Russ.)
25. Ishii F., Ban-ya Sh., Fuwa T. Solubility of nitrogen in liquid iron alloys. *Tetsu-to-Hagane*. 1982, vol. 68, no. 10, pp. 1560–1568. [http://doi.org/10.2355/tetsutohagane1955.68.10\\_1551](http://doi.org/10.2355/tetsutohagane1955.68.10_1551)
26. Lupis C.H.P., Elliott J.F. The relation between interaction coefficients  $\epsilon$  and  $e$ . *Transactions of the Metallurgical Society of AIME*. 1965, vol. 233, no. 1, pp. 257–258.
27. Lysenkova E.V. *Improving the accuracy of calculation of the solubility of nitrogen and titanium nitride in iron-base melts. Application to nitrogen and titanium alloyed steel: Cand. Tech. Sci. Diss*. Moscow: 2015, 75 p. (In Russ.)
28. Pak J.-J., Jeong J.-S., Tae S.-J., Kim D.S., Lee J.Yo. Thermodynamics of titanium and nitrogen in an Fe–Ni melt. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2005, vol. 36, no. 4, pp. 489–493. <http://doi.org/10.1007/s11663-005-0040-1>
29. Hultgren R., Desai P.D., Hawkins D.T., etc. *Selected Values of Thermodynamic Properties of Binary Alloys*. Metals Park, Ohio: ASFM, 1973, 1435 p.
30. 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.). <http://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-9-713-718>
31. Bol'shov L.A. *Statistical theory of multicomponent and low-concentration alloys. Dr. Phys.-Math. Sci. Diss*. Moscow: 1991, 496 p. (In Russ.)

## 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

**Светлана Константиновна Корнейчук**, к.ф.-м.н., доцент кафедры физики, Вологодский государственный университет

**E-mail:** korn62@mail.ru

**Элина Леонидовна Большова**, доцент кафедры английского языка, Вологодский государственный университет

**Leonid A. Bol'shov**, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof. of the Chair of Mathematics and Informatics, Vologda State University

**E-mail:** labolshov@mail.ru

**Svetlana K. Korneichuk**, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assist. Prof. of the Chair of Physics, Vologda State University

**E-mail:** korn62@mail.ru

**Elina L. Bol'shova**, Assist. Prof. of the Chair of English, Vologda State University

Поступила в редакцию 13.10.2020

После доработки 13.10.2020

Принята к публикации 01.03.2021

Received 13.10.2020

Revised 13.10.2020

Accepted 01.03.2021