



Оригинальная статья

УДК 669.15:544.35:546.17:546.74

DOI 10.17073/0368-0797-2021-9-693-697



## ВАГНЕРОВСКИЙ ПАРАМЕТР ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АЗОТА С ХРОМОМ В ЖИДКИХ СПЛАВАХ НА ОСНОВЕ НИКЕЛЯ

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

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

**Аннотация.** Предложена простая теория термодинамических свойств жидких растворов азота в сплавах системы Ni–Cr. Эта теория полностью аналогична теории для жидких растворов азота в сплавах системы Fe–Cr и Fe–Mn, предложенных авторами ранее в 2019 и 2020 г. Теория основана на решеточной модели растворов Ni–Cr. Предполагается модельная решетка типа ГЦК. В узлах этой решетки располагаются атомы никеля и хрома. Атомы азота располагаются в октаэдрических междоузлиях. Атом азота 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. Принимается, что жидкие растворы в системе Ni–Cr являются совершенными. В рамках предложенной теории получено выражение для вагнеровского параметра взаимодействия азота с хромом в жидких сплавах на основе никеля. Правая часть соответствующей формулы представляет собой функцию отношения констант закона Сиверта для растворимости азота в жидких хроме и никеле. Значение этих констант для температуры 1873 К приняты равными  $K'(\text{Cr}) = 15,2$ ;  $K'(\text{Ni}) = 0,0015\%$  (по массе). При этом получена оценка для вагнеровского параметра взаимодействия в сплавах на основе никеля  $\varepsilon_{\text{N}}^{\text{Cr}} = 21,4$ . Это соответствует значению лангенберговского параметра взаимодействия  $e_{\text{N}}^{\text{Cr}} = -0,105$ , что очень близко к экспериментальным оценкам  $e_{\text{N}}^{\text{Cr}} = -0,108$  для температуры 1873 К (Суровой и др., 1971 г.) и  $e_{\text{N}}^{\text{Cr}} = -0,11$  для температуры 1823 К (Стомахин и др., 1965 г.).

**Ключевые слова:** термодинамика, растворы, азот, хром, никель, коэффициенты активности, вагнеровский параметр взаимодействия, лангенберговский параметр взаимодействия, закон Сиверта

**Для цитирования:** Большов Л.А., Корнейчук С.К., Большова Э.Л. Вагнеровский параметр взаимодействия азота с хромом в жидких сплавах на основе никеля // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 9. С. 693–697.  
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-9-693-697>

Original article

## WAGNER INTERACTION COEFFICIENT BETWEEN NITROGEN AND CHROMIUM IN LIQUID NICKEL-BASED ALLOYS

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

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

**Abstract.** The authors propose a simple theory of thermodynamic properties of nitrogen solutions in liquid Ni–Cr alloys. This theory is completely analogous to the theory for liquid nitrogen solutions in alloys of the Fe–Cr and Fe–Mn systems proposed previously by the authors in 2019 and 2020. The theory is based on lattice model of the Ni–Cr solutions. The model assumes FCC lattice. In the sites of this lattice are the atoms of Ni and Cr. Nitrogen atoms are located in octahedral interstices. The nitrogen 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 composition nor on the temperature. It is supposed that the solutions in the Ni–Cr system are perfect. Within the framework of the proposed theory, a relation is obtained that expresses the Wagner interaction coefficient between nitrogen and chromium in liquid nickel-based alloys. The right-hand part of the appropriate formula is a function of ratio of the Sieverts law constants for solubility of nitrogen in liquid chromium and nickel. The values of these constants for the temperature of 1873 K are assumed to be  $K'(\text{Cr}) = 15,2$ ;  $K'(\text{Ni}) = 0,0015\text{ wt. \%}$ . An estimate is obtained for the Wagner interaction coefficient in nickel-based alloys  $\varepsilon_{\text{N}}^{\text{Cr}} = 21,4$ . This corresponds to the value of the Langenberg interaction coefficient  $e_{\text{N}}^{\text{Cr}} = -0,105$ , which is very close to the experimental estimates  $e_{\text{N}}^{\text{Cr}} = -0,108$  for the temperature of 1873 K (Surovoi et al., 1971) and  $e_{\text{N}}^{\text{Cr}} = -0,11$  for the temperature of 1823 K (Stomakhin et al., 1965).

**Keywords:** thermodynamics, solutions, nitrogen, chromium, 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 interaction coefficient between nitrogen and chromium in liquid nickel-based alloys. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 9, pp. 693–697. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-9-693-697>

Элемент хром был открыт химиком Вокленом в 1797 г. [1]. Этот элемент сыграл и продолжает играть очень большую роль в металлургии стали и сплавов на основе никеля. В 1906 г. Маршем был изобретен жаростойкий сплав нихром [2]. В 1913 г. Брайерли изобрел хромистую нержавеющую сталь [3]. Эти изобретения показали, что легирование сплавов на основе железа и никеля хромом при достаточно большой концентрации хрома открывает возможность получения коррозионностойких и жаростойких металлических материалов. В 30-х годах прошлого века начались разработка и производство жаропрочных сплавов на основе железа и никеля. В этих сплавах содержание хрома, как правило, превышает содержание каждого из остальных легирующих элементов. В настоящее время роль хрома в производстве коррозионностойких, жаростойких и жаропрочных сплавов очень велика, 78 % добываемого в мире хрома расходуется на производство нержавеющей стали [4]. В настоящей работе рассматриваются сплавы на основе никеля. На эксплуатационные характеристики этих сплавов существенное влияние оказывает содержание в них азота [5]. Экспериментальное изучение растворимости азота в жидком никеле началось в 1959 г.

Растворимость азота в жидких сплавах  $[\% \text{ N}]^*$ , выраженная в процентах по массе, при парциальном давлении азота в газовой фазе  $P_{\text{N}_2}$ , если  $P_{\text{N}_2}$  достаточно мало, подчиняется закону Сиверта [6]. Запишем этот закон в виде [7]:

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

где  $P_0$  – стандартное давление ( $P_0 = 1 \text{ атм} \approx 0,101 \text{ МПа}$ ),  $K'$  – константа закона Сиверта для растворимости азота в жидком сплаве. Значение  $K'$  для растворимости азота в жидком никеле обозначим как  $K'(\text{Ni})$ . Экспериментальные значения  $K'(\text{Ni})$  при абсолютной температуре  $T = 1873 \text{ К}$ , полученные различными исследователями с использованием разных методов измерения растворимости азота в жидком никеле (метод Сиверта [6], метод закалки образцов, метод левитационного плавления) за период 1959 – 2019 гг., перечислены ниже: 0,0025 [8]; 0,00050 – 0,00121 [9]; 0,00126 [10]; 0,0015 [11]; 0,0013 [12]; 0,0144 [13]; 0,0015 [14]; 0,0015 [15]; 0,0013 – 0,0035 [16]; 0,0013 [17]; 0,0020 [18]; 0,0009 [19] (при  $T = 1823 \text{ К}$ ); 0,0015 [20] % (по массе). Среднее значение  $K'(\text{Ni})$  при  $T = 1873 \text{ К}$  можно оценить как 0,0015 % (по массе).

Значение  $K'$  для растворимости азота в жидком хrome обозначим как  $K'(\text{Cr})$ . Температура плавления хрома значительно выше 1873 К. Растворение азота в хроме понижает температуру ликвидус сплава Cr–N. Однако непосредственно экспериментально можно оценить величину  $K'(\text{Cr})$  при температурах не ниже 1973 К. По-

этому значение  $K'(\text{Cr})$  при  $T = 1873 \text{ К}$  можно понимать как результат экстраполяции экспериментальных значений на температуру 1873 К. В этом смысле значения  $K'(\text{Cr})$  при  $T = 1873 \text{ К}$  оценены по экспериментальным данным как 29,2 [9]; 15,2 [21]; 13,3 [22] % (по массе). В работе [7] приведены теоретические соображения, позволяющие считать наиболее правдоподобным значение  $K'(\text{Cr}) = 15,2$ .

Растворимость азота в некоторых жидких жаростойких и жаропрочных сплавах на основе никеля была измерена экспериментально в работе [23]. Однако для получения систематического представления по этому вопросу необходимо знать, наряду со значением константы  $K'(\text{Ni})$ , значения вагнеровских [24] параметров взаимодействия  $\epsilon_{\text{N}}^j$  азота с легирующими элементами  $j$  в расплавах на основе никеля [25]. Целью настоящей работы является оценка наиболее правдоподобного значения вагнеровского параметра взаимодействия азота с хромом в жидких сплавах на основе никеля при температуре 1873 К с точки зрения модельной теории [7], разработанной первоначально применительно к расплавам системы Fe–Cr.

Рассмотрим растворы азота в жидких сплавах системы Ni–Cr. Концентрации компонентов в этих растворах, выраженные в мольных долях, обозначим как  $c_{\text{Ni}}$ ,  $c_{\text{Cr}}$ ,  $c_{\text{N}}$  для компонентов Ni, Cr, N соответственно. В практической металлургии и в исследованиях прикладного характера принято выражать концентрации компонентов сплава в процентах по массе. При таком способе выражения концентрации упомянутых компонентов обозначим как  $[\% \text{ Ni}]$ ,  $[\% \text{ Cr}]$ ,  $[\% \text{ N}]$ . Пусть  $a_{\text{N}}$  – термодинамическая активность азота в растворе. Отношение  $\gamma_{\text{N}} = \frac{a_{\text{N}}}{c_{\text{N}}}$  называется рациональным коэффициентом активности азота. Отношение  $f_{\text{N}} = \frac{a_{\text{N}}}{[\% \text{ N}]}$  назовем массово-процентным коэффициентом активности азота. Производные

$$\epsilon_{\text{N}}^{\text{Cr}} = \frac{\partial \ln \gamma_{\text{N}}}{\partial c_{\text{Cr}}} \text{ при } c_{\text{Ni}} \rightarrow 1;$$

$$e_{\text{N}}^{\text{Cr}} = \frac{\partial \lg f_{\text{N}}}{\partial [\% \text{ Cr}]} \text{ при } [\% \text{ Ni}] \rightarrow 100$$

называются термодинамическими параметрами взаимодействия первого порядка азота с хромом в жидких сплавах на основе никеля [26]. Параметр  $\epsilon_{\text{N}}^{\text{Cr}}$  называется вагнеровским [24] параметром взаимодействия. Параметр  $e_{\text{N}}^{\text{Cr}}$  можно назвать лангенберговским параметром взаимодействия, так как подобные параметры были введены Лангенбергом в 1956 г. Между вагнеровским и лангенберговским параметрами взаимодействия установлено [27] соотношение типа

$$\epsilon_{\text{N}}^{\text{Cr}} = 230,3 \frac{A_{\text{Cr}}}{A_{\text{Ni}}} e_{\text{N}}^{\text{Cr}} + \frac{A_{\text{Ni}} - A_{\text{Cr}}}{A_{\text{Ni}}}, \quad (1)$$

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

$$e_N^{Cr} = \frac{1}{230,3} \frac{A_{Ni}}{A_{Cr}} \left( \varepsilon_N^{Cr} - \frac{A_{Ni} - A_{Cr}}{A_{Ni}} \right). \quad (2)$$

Далее предлагается простая теория термодинамических свойств жидких растворов азота в сплавах Ni–Cr. Эта теория полностью аналогична теории для жидких растворов азота в сплавах системы Fe–Cr [7]. Теория основана на решеточной модели растворов Ni–Cr. Предполагается модельная решетка типа ГЦК. В узлах этой решетки располагаются атомы никеля и хрома. Атомы азота располагаются в октаэдрических междоузлиях. Атом азота 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 Ni–Cr являются совершенными. Будем учитывать лишь конфигурационную составляющую энтропии сплава. Сформулированную модель рассматриваем методами статистической механики. Пользуясь результатами работы [7], для рассматриваемой модели имеем:

$$K'(Cr) = K'(Ni) \frac{A_{Ni}}{A_{Cr}} \left( 1 - \frac{1}{6} \varepsilon_N^{Cr} \right)^6. \quad (3)$$

Решение уравнения (3) относительно параметра взаимодействия  $\varepsilon_N^{Cr}$  имеет вид:

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

Подставим в правую часть формулы (4) значения  $K'(Ni) = 0,0015$ ;  $K'(Cr) = 15,2$ ;  $A_{Ni} = 58,71$ ;  $A_{Cr} = 51,996$ . Получим:  $\varepsilon_N^{Cr} = -21,4$  для  $T = 1873$  К. Тогда формула (2) дает значение  $e_N^{Cr} = -0,105$ .

Приведем некоторые экспериментальные значения параметра взаимодействия  $e_N^{Cr}$  в жидких сплавах на основе никеля, полученные путем измерения растворимости азота в расплавах системы Ni–Cr:  $-0,13$  [9];  $-0,11$  при  $T = 1823$  К [10];  $-0,098$  [11];  $-0,108$  [14];  $-0,093$  [15];  $-0,0766$  [28];  $-0,0952$  при  $T = 1823$  К [19]. Среднее арифметическое значение этих величин составляет  $e_N^{Cr} = -0,102$ . Теоретическая оценка, полученная в настоящей работе,  $e_N^{Cr} = -0,105$  очень близка к этому значению. К теоретической оценке очень близки экспериментальные значения  $e_N^{Cr} = -0,108$  при  $T = 1873$  К [14] и  $e_N^{Cr} = -0,11$  при  $T = 1823$  К [10].

В заключение рассмотрим вопрос о температурной зависимости вагнеровского параметра взаимодействия  $e_N^{Cr}$  в жидких сплавах на основе никеля. Это сдела-

ем в рамках сформулированной выше модели. Пусть энергия взаимодействия атома азота с атомом никеля, находящимся в ближайшем окружении атома азота, равна  $U_{N-Ni}$ . Аналогичная величина, если атом никеля заменить атомом хрома, пусть равна  $U_{N-Cr}$ . Разность  $h = U_{N-Cr} - U_{N-Ni}$  есть энергия сближения атома хрома с атомом азота в жидком никеле. Согласно рассматриваемой модели  $h = \text{const}$ . Методами статистической механики легко получить формулу [7, 29]

$$\varepsilon_N^{Cr} = \delta \left[ 1 - \exp \left( -\frac{h}{K_B T} \right) \right], \quad (5)$$

где  $\delta$  – число узлов ГЦК решетки в ближайшем окружении октаэдрического междоузлия ( $\delta = 6$ ),  $K_B$  – постоянная Больцмана. Значение параметра взаимодействия  $\varepsilon_N^{Cr}$  при температуре  $T$  обозначим как  $\varepsilon_N^{Cr}(T)$ , значение этого параметра при температуре  $T_0$  – как  $\varepsilon_N^{Cr}(T_0)$ . Из формулы (5) следует:

$$\varepsilon_N^{Cr}(T) = \delta \left[ 1 - \left( 1 - \frac{\varepsilon_N^{Cr}(T_0)}{\delta} \right)^{\frac{T_0}{T}} \right]. \quad (6)$$

Используя формулы (1), (2) и (6), легко пересчитать значения параметров взаимодействия  $\varepsilon_N^{Cr}$  и  $e_N^{Cr}$ , известные при температуре  $T_0 = 1823$  К, на температуру  $T = 1873$  К.

Применим соответствующую процедуру к результатам работы [10], где при  $T_0 = 1823$  К найдено экспериментальное значение  $e_N^{Cr} = -0,11$ . По формуле (1) находим, что при  $T = 1823$  К  $\varepsilon_N^{Cr} = -22,32$ . Затем по формуле (6) находим значение этого параметра  $\varepsilon_N^{Cr} = -21,17$  при  $T = 1873$  К. В результате по формуле (2) устанавливаем, что при  $T = 1873$  К имеет место  $e_N^{Cr} = -0,103$ . Это очень близко к теоретическому значению  $e_N^{Cr} = -0,105$ , полученному выше.

Таким образом, наиболее правдоподобными экспериментальными результатами можно считать значения  $e_N^{Cr} = -0,108$  при  $T = 1873$  К [14] и  $e_N^{Cr} = -0,11$  при  $T = 1823$  К [10].

## Выводы

Наиболее правдоподобны экспериментальные значения лангенберговского параметра взаимодействия в жидких сплавах на основе никеля  $e_N^{Cr} = -0,108$  при  $T = 1873$  К [14] и  $e_N^{Cr} = -0,11$  при  $T = 1823$  К [10].

Теоретический расчет значения вагнеровского параметра взаимодействия  $e_N^{Cr}$  в жидких сплавах на основе никеля при  $T = 1873$  К дает  $\varepsilon_N^{Cr} = -21,4$ . Этому соответствует значение лангенберговского параметра взаимодействия  $e_N^{Cr} = -0,105$ .

Теоретический пересчет на температуру  $T = 1873$  К результата работы [10] приводит к значению  $e_N^{Cr} = -0,103$ .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Nicolas-Louis Vauquelin. French chemist. In: *Encyclopedia Britannica*. [Electronic resource]. Available at URL: <https://www.britannica.com/biography/Nicolas-Louis-Vauquelin> (Accessed 30.06.2021).
2. Nichrome. *Wikipedia*. [Electronic resource]. Available at URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Nichrome> (Accessed 30.06.2021).
3. Thomas G.P. The History of Stainless Steel – Celebrating 100 Years. [Electronic resource]. Available at URL: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=8307> (Accessed 04.12.2021).
4. Chromium. Outlook to 2030, 17<sup>th</sup> Edition. Roskill. [Electronic resource]. Available at URL: <https://roskill.com/market-report/chromium/> (Accessed 30.06.2021).
5. 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.
6. 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>
7. 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>
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. Lange K.W., Schenck H. Gas solubility measurements and derivation of inherent thermodynamic information // *Metallurgical Transactions*. 1970. Vol. 1. No. 7. P. 2036–2038.
14. Суровой Ю.Н., Окорок Г.Н., Неведова С.А. Растворимость азота в расплавах железа и никеля с хромом // *Доклады советских ученых на III советско-японском симпозиуме по физико-химическим основам металлургических процессов*. М.: Институт металлургии им. А.А. Байкова, 1971.
15. Буцкий Е.В., Григорян В.А., Филиппов А.Ф., Топилин В.В., Краснова И.А. Растворимость азота в многокомпонентных сплавах на основе никеля // *Известия вузов. Черная металлургия*. 1975. № 1. С. 47–51.
16. 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.
17. Wada H., Pehlke R.D. Solubility of nitrogen in liquid Fe–Cr–Ni alloys containing manganese and molybdenum // *Metallurgical Transactions B*. 1977. Vol. 8. No. 4. P. 675–682. <http://doi.org/10.1007/BF02658639>
18. 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>
1. Nicolas-Louis Vauquelin. French chemist. *Encyclopedia Britannica*. [Electronic resource]. Available at URL: <https://www.britannica.com/biography/Nicolas-Louis-Vauquelin> (Accessed 30.06.2021).
2. Nichrome. *Wikipedia*. [Electronic resource]. Available at URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Nichrome> (Accessed 30.06.2021).
3. Thomas G.P. *The History of Stainless Steel – Celebrating 100 Years*. [Electronic resource]. Available at URL: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=8307> (Accessed 04.12.2021).
4. *Chromium*. Outlook to 2030, 17<sup>th</sup> Edition. Roskill. [Electronic resource]. Available at URL: <https://roskill.com/market-report/chromium/> (Accessed 30.06.2021).
5. 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>
6. 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>
7. 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>
8. 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.).
9. 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.
10. 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.).
11. 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.).
12. 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.
13. Lange K.W., Schenck H. Gas solubility measurements and derivation of inherent thermodynamic information. *Metallurgical Transactions*. 1970, vol. 1, no. 7, pp. 2036–2038.
14. Surovoi Yu.N., Okorokov G.N., Nefedova S.A. Solubility of nitrogen in melts of iron and nickel with chromium. In: *Reports of Soviet Scientists at the 3<sup>rd</sup> Soviet-Japanese Symp. on Physico-Chemical Fundamentals of Metallurgical Processes, September 27–29, 1971, Moscow*. Institut metallurgii im. A.A. Baikova, 1971. (In Russ.).
15. Butskii E.V., Grigoryan V.A., Filippov A.F., Topilin V.V., Krasnova I.A. Solubility of nitrogen in multicomponent nickel-based alloys. *Izvestia. Ferrous Metallurgy*. 1975, no. 1, pp. 47–51. (In Russ.).
16. 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.
17. 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>
18. 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>



19. Kowanda C., Speidel M.O. Solubility of nitrogen in liquid nickel and binary Ni–X<sub>i</sub> alloys (X<sub>i</sub> = 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)
20. 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>
21. Ishii F., Iguchi Ya., Ban-ya Sh. Solubility of nitrogen in liquid chromium and chromium-iron alloys // *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan*. 1986. Vol. 26. No. 2. P. 128–132. <https://doi.org/10.2355/isijinternational1986.26.128>
22. Помарин Ю.М., Григоренко Г.М., Шереверя А.В. Абсорбция азота высокохромистыми расплавами и жидким хромом при повышенном давлении // *Известия АН СССР. Металлы*. 1990. № 5. С. 40–45.
23. Pehlke R.D., Rizescu C. Solubility of nitrogen in molten heat-resistant alloys // *Journal of the Iron and Steel Institute*. 1971. Vol. 209. No. 10. P. 776–778.
24. Вагнер К. Термодинамика сплавов. М.: Металлургиздат, 1957. 179 с.
25. Большов Л.А., Стомахин А.Я., Соколов В.М., Тетерин В.Г. О растворимости азота в многокомпонентных расплавах на основе никеля // *Известия АН СССР. Металлы*. 1984. № 5. С. 60–62.
26. Люпис К. Химическая термодинамика материалов. М.: Металлургия, 1989. 503 с.
27. 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.
28. 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>
29. Большов Л.А. Статистическая теория многокомпонентных и малоконцентрированных сплавов. Дисс. ... докт. физ.-мат. наук. М.: МГУ, 1991. 496 с.
19. Kowanda C., Speidel M.O. Solubility of nitrogen in liquid nickel and binary Ni–X<sub>i</sub> alloys (X<sub>i</sub> = 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)
20. 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>
21. Ishii F., Iguchi Ja., Ban-ya Sh. Solubility of nitrogen in liquid chromium and chromium-iron alloys. *Transaction of the Iron and Steel Institute of Japan*. 1986, vol. 26, no. 2, pp. 128–132. <https://doi.org/10.2355/isijinternational1986.26.128>
22. Pomarin Yu.M., Grigorenko G.M., Sherevera A.V. Absorption of nitrogen by high-chromium melts and liquid chromium at elevated pressure. *Izvestiya AN SSSR. Metall.* 1990, no. 5, pp. 40–45. (In Russ.).
23. Pehlke R.D., Rizescu C. Solubility of nitrogen in molten heat-resistant alloys. *Journal of the Iron and Steel Institute*. 1971, vol. 209, no. 10, pp. 776–778.
24. Wagner C. *Thermodynamics of Alloys*. Cambridge: Addison-Wesley Press, 1952, 162 p. (Russ. ed.: Wagner C. *Termodinamika spлавov*. Moscow: Metallurgizdat, 1957, 179 p.).
25. Bol'shov L.A., Stomakhin A.Ya., Sokolov V.M., Teterin V.G. On solubility of nitrogen in multicomponent nickel-based melts. *Izvestiya AN SSSR. Metall.* 1984, no. 5, pp. 60–62. (In Russ.).
26. Lupis C.H.P. *Chemical Thermodynamics of Materials*. New York: North Holland. 1983, 581 p. (Russ. ed.: Lupis C. *Khimicheskaya termodinamika materialov*. Moscow: Metallurgiya, 1989, 503 p.).
27. 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.
28. 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>
29. 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

**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

**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

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

#### ВКЛАД АВТОРОВ:

**Большов Л.А.** – идея и текст статьи.

**Корнейчук С.К.** – анализ метода и результатов, оформление текста и документации, переписка с редакцией.

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

Поступила в редакцию 12.04.2021

После доработки 12.04.2021

Принята к публикации 28.06.2021

Received 12.04.2021

Revised 12.04.2021

Accepted 28.06.2021