ISSN: 0368–0797. Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2018. Том 61. № 9. С. 737 – 742.
© 2018. *Акбердин А.А., Ким А.С., Султангазиев Р.Б.*

УДК 669.168:541.11

ПЛАНИРОВАНИЕ ЧИСЛЕННОГО И ФИЗИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Акбердин А.А., *д.т.н, профессор, заведующий лабораторией «Бор»*
Ким А.С., *д.т.н, главный научный сотрудник лаборатории «Бор»*
Султангазиев Р.Б., *PhD, старший научный сотрудник лаборатории «Бор»* (sulrus83@mail.ru)

Химико-металлургический институт им. Ж. Абишева
(100009, Республика Казахстан, Караганда, ул. Ермекова, 63)

Аннотация. Технологические процессы являются многофакторными. Выбор наиболее значимых из них для корректного анализа объекта исследований является важной задачей. Для такого ранжирования факторов исследователи обычно опираются на собственный опыт или мнения специалистов в этой области, оценивая их согласованность по математическим критериям. Однако при разработке нового процесса такой подход не может быть использован. В этом случае прибегают к экспериментальным методам отбора факторов. Но затратность, длительность, а иногда и невозможность использования этого метода очевидна. В настоящей работе использован другой подход. Было учтено, что термодинамическое моделирование является экспериментом, но только численным. Поэтому к нему можно применить метод математического планирования эксперимента, позволяющий при одном расчете учесть влияние на целевую функцию более десятка факторов. Получаемые в этом случае частные зависимости показателей процесса позволяют без постановки физических экспериментов отсеять малозначимые факторы и оставить сильные. Другим важным преимуществом применения предлагаемого подхода является возможность оценки динамики изменения фазового и элементного состава продуктов плавки, порога реализуемости процесса по шихтовым и температурным условиям с контролем достоверности полученных данных по математическим критериям. Метод позволяет также вывести обобщенное уравнение зависимости контролируемого параметра процесса от всех влияющих факторов, что невозможно при обычном моделировании. Для иллюстрации такой подход применен в ходе разработки технологии производства ферробора карботермическим способом с использованием местного сырья. Термодинамическое моделирование выполнено с применением заранее отобранных расчетным путем факторов. Их же использовали при физическом моделировании процесса на высокотемпературной печи. Эксперимент подтвердил значимость отобранных теоретическим способом факторов. Применением метода планирования достигнуто также сокращение количества численных экспериментов в 25, а физических в 125 раз без ущерба для точности прогнозируемых данных. Использование изложенного подхода позволяет сопоставлением расчетных данных с результатами физического эксперимента разработать меры по приближению практических результатов к равновесным с применением сильно действующих факторов.

Ключевые слова: термодинамическое и физическое моделирование, факторы, планирование эксперимента, уравнение регрессии, коэффициент детерминации.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-9-737-742

Моделирование является эффективным инструментом анализа существующих и создания новых технологических процессов. Оно может выполняться численными или физическими методами. Одной из разновидностей моделирования является термодинамическое моделирование химически реагирующих систем [1 – 5]. Благодаря своей эффективности оно нашло широкое применение для разработки новых процессов и металлов [6 – 10]. В настоящей работе рассматривается возможность применения при термодинамическом моделировании математического метода планирования эксперимента. Диктуется это тем, что технологические процессы являются многофакторными и выбор наиболее значимых из них для корректного анализа объекта исследований является важной задачей. Для такого ранжирования обычно опираются на собственный опыт или мнение специалистов в этой области, оценивая согласованность поступивших предложений по математическим критериям [11]. Однако при разработке нового процесса такой подход не может быть использован. В этом случае прибегают к экспериментальным методам отбора факторов. Но затратность, длительность, а иногда и невозможность использования такого подхода очевидны.

По мнению авторов, можно использовать другой подход. Учитывали, что термодинамическое моделирование является экспериментом, но только численным, и к нему может быть применен метод математического планирования, позволяющий за один расчет учесть влияние на целевую функцию более десятка факторов [11]. Получаемые в этом случае частные зависимости показателей процесса позволяют без постановки физических экспериментов отсеять малозначимые факторы и оставить сильные.

Отметим еще одно обстоятельство целесообразности использования метода планирования при термодинамическом моделировании. Дело в том, что расчет на разработанном в России и использованном авторами

комплексе TERRA [12, 13] выполняется достаточно быстро, но при анализе влияния множества факторов (k), меняющихся на нескольких уровнях (m), приходится выполнять много расчетов (N), количество которых определяется как $N = mk$. Особую сложность представляет подготовка исходных данных, поскольку необходимо рассчитать шихту, количество поступающих в плавильный агрегат отдельных оксидов, углеродистых или металлических восстановителей и газов. Так, если для оценки процесса отобрано шесть факторов, меняющихся на пяти уровнях, то необходимо выполнить $N = 5^6 = 15\,625$ расчетов, а в дальнейшем столько же физических экспериментов, не считая повторения каждого из них в идентичных условиях для получения устойчивых средних значений. Выходом из положения может явиться применение метода математического планирования эксперимента, когда количество расчетов и опытов можно сократить в десятки и сотни раз. В работе применен метод планирования на латинских квадратах [14], модернизированный в Химико-металлургическом институте [15, 16]. Реализуемость изложенного подхода демонстрируется на примере разработки технологического процесса производства ферробора карботермическим способом с использованием кокса из малозольных углей Шубаркульского месторождения [17].

Стандартная справочная база комплекса TERRA была пополнена ожидаемыми в металле и шлаке соединениями на основании построения диаграмм фазового состава системы $B_2O_3-CaO-SiO_2-Al_2O_3$ [18] и $Fe-Si-B-C$ [19]. При численном моделировании в качестве факторов, влияющих на процесс, выбраны температура, расход кокса, содержание в шихте B_2O_3, CaO, MgO и Al_2O_3 (табл. 1), поскольку эти оксиды содержатся в природных шихтовых материалах. Выполнены предварительные расчеты по ранжированию факторов, которые показали, что MgO и Al_2O_3 слабо влияют на содержание бора в металле. Если при добавке в шихту 20 г CaO содержание бора в металле снижается на 0,862 %, то аналогичные количества MgO и Al_2O_3 снижают содержание бора на 0,034 и 0,002 % соответственно. Графики зависимости содержания бора от MgO и Al_2O_3 представляют собой прямую, практически параллельную горизонтальной оси (см. рисунок, *д*, *е*). Количественно это видно по величине коэффициента при аргументе x в выведенных уравнениях, представляющего собой тангенс угла наклона прямой. По указанным выше причинам факторы MgO и Al_2O_3 при численном, а в дальнейшем и физическом моделировании исключили из плана.

Контролируемым первичным показателем является содержание бора в металле (B), а вторичным – его извлечение в металл, т. е. коэффициент перехода. Такие сведения из расчетов можно извлечь для всех участвующих в процессе элементов. При четырех оставленных факторах, меняющихся на пяти уровнях, необходимо выполнить $N = 5^4 = 625$ расчетов. При использовании метода оптимального планирования можно произвести не 625, а 25 расчетов, т. е. в 25 раз меньше и получить данные по влиянию на процесс всех факторов [11, 14].

Таблица 1

Факторы и их уровни

Table 1. **Factors and their levels**

Фактор		Уровень факторов				
		1	2	3	4	5
x_1	Температура, К	1823	1873	1923	1973	2023
x_2	Расход B_2O_3, г	50	55	60	65	70
x_3	Расход кокса (К), г	45	50	55	60	65
x_4	Расход CaO, г	0	5	10	15	20
x_5	Расход MgO, г	0	5	10	15	20
x_6	Расход Al_2O_3, г	0	5	10	15	20

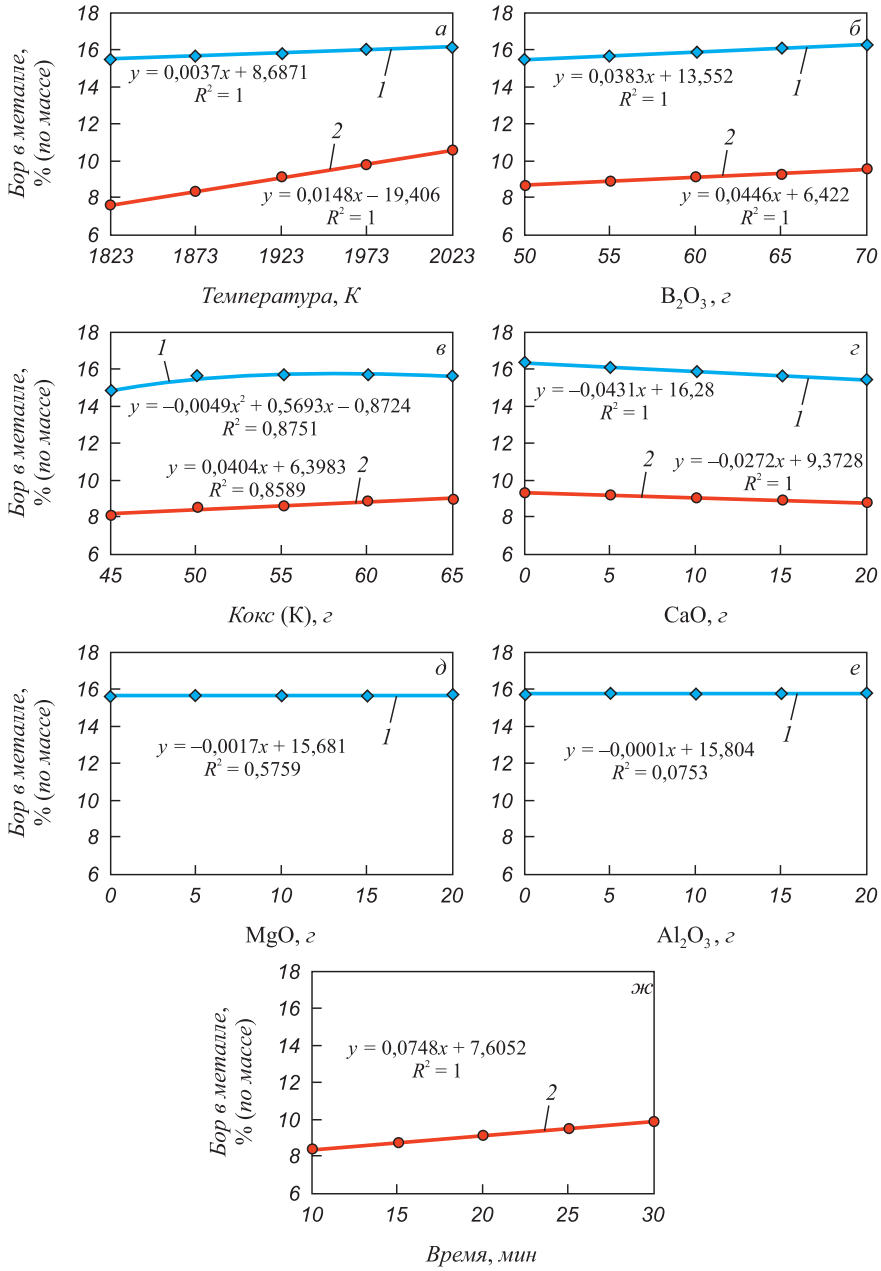
В табл. 2 показаны составы металлов по всем 25 вариантам расчета и коэффициенты извлечения бора из шихты в металл (K_B). Можно видеть, что предложенный процесс реализуем и по нему достигается высокое извлечение бора в металл.

Все отобранные факторы оказались значимыми и их связи с содержанием бора в металле описываются уравнениями с высокими коэффициентами корреляции (см. рисунок). Рост температуры процесса, содержания B_2O_3 и кокса (К) в шихте способствуют повышению концентрации бора в металле, а CaO – снижению.

С использованием метода планирования провели опыты в печи Таммана, включив в матрицу, помимо предварительно отобранных четырех, временной фактор. По результатам опытов построены частные зависимости содержания бора в металле от всех изученных пяти факторов. Все они значимы, что было предсказано выше термодинамическим моделированием (см. рисунок).

Результаты экспериментов по элементному составу металлов показаны в табл. 2. В установленных условиях опыта запланированное количество в металле бора (15 – 20 %) не достигается из-за пониженных коэффициентов его извлечения по сравнению с равновесными (см. табл. 2). Для устранения этого недостатка можно использовать наиболее сильный (см. рисунок, *б*) и технологически реализуемый фактор – повышение количества B_2O_3 в шихте в соответствии с реальными коэффициентами извлечения бора в металл (см. табл. 2). Это известный из практики работы заводов прием. Эксперимент также подтверждает реализуемость процесса с использованием местного сырья. Применимость карботермического ферробора для легирования стали установлена [20].

Выводы. Таким образом, использование метода математического планирования эксперимента при термодинамическом моделировании позволяет заранее отобрать наиболее сильно влияющие на процесс фак-



Зависимость содержания бора в металле от температуры (*а*), количества B_2O_3 (*б*), кокса (*в*), CaO (*г*), MgO (*д*), Al_2O_3 (*е*) в шихте и времени (*ж*):
1 – расчет; *2* – опыт

Dependence of boron content in the metal on temperature (*а*), amount of B_2O_3 (*б*), coke (*в*), CaO (*г*), MgO (*д*), Al_2O_3 (*е*) in the charge and time (*ж*):
1 – расчет; *2* – опыт

торы, вывести соответствующие уравнения, оценить их адекватность по математическим критериям, сократив тем самым материальные и временные затраты на создание новых технологий. Не предвидится препятствий для использования изложенного подхода для анализа и других процессов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Andersson J.O., Helander T., Höglund L. etc. Thermo-Calc and DICTRA, Computational tools for materials science // Calphad. 2002. Vol. 26. P. 273 – 312.
2. Трусов Б.Г. Моделирование химических и фазовых равновесий при высоких температурах (АСТРА.4). Версия 1.06. – М.: МГТУ им. Баумана, 1991. – 37 с.
3. Белов Г.В. Термодинамическое моделирование: методы, алгоритмы, программы. – М.: Научный Мир, 2002. – 186 с.
4. Ватолин Н.А., Моисеев Г.К., Трусов Б.Г. Термодинамическое моделирование в высокотемпературных неорганических системах. – М.: Металлургия, 1994. – 352 с.
5. Моисеев Г.К., Вяткин Г.П.Термодинамическое моделирование в неорганических системах. – Челябинск: Изд-во Южно-Уральского государственного университета, 1999. – 256 с.
6. Пупышев А.А., Музгин В.Н., Васильева Н.Л. Термодинамическое моделирование атомизации элементов в пламенах аце-

Таблица 2

Состав металла и коэффициент извлечения бора*

Table 2. **Composition of the metal and recovery coefficient of boron***

Номер опыта	Содержание элементов в металле, %					$K_В$, %	Номер опыта	Содержание элементов в металле, %					$K_В$, %
	Fe	Si	C	B	Al			Fe	Si	C	B	Al	
1	83,30/90,74	0,78/0,94	0,30/2,22	15,51/5,94	0,11/0,17	88,34/37,89	14	82,32/86,78	0,33/1,80	0,22/2,28	16,93/8,98	0,19/0,17	69,09/41,81
2	82,47/88,96	1,31/1,66	0,41/1,45	15,68/7,83	0,13/0,10	76,92/42,01	15	81,75/86,55	1,29/1,85	1,29/2,55	15,56/8,95	0,12/0,11	71,02/44,54
3	80,27/89,85	1,27/1,67	3,05/1,22	15,26/7,16	0,14/0,10	83,91/41,66	16	79,48/85,58	1,26/1,70	3,23/2,48	15,82/10,06	0,20/0,19	96,62/64,96
4	80,04/87,88	1,27/1,66	3,36/1,93	15,22/8,42	0,12/0,11	65,91/39,13	17	80,58/81,97	0,86/2,11	2,43/2,11	15,91/13,61	0,22/0,20	79,85/75,92
5	80,20/89,64	1,27/1,92	3,16/1,24	15,25/7,08	0,13/0,12	72,50/35,5	18	82,48/86,79	1,25/2,12	0,97/2,82	15,09/8,09	0,21/0,19	80,73/46,87
6	79,75/87,85	1,27/1,54	3,14/2,57	15,74/7,95	0,10/0,10	95,86/51,59	19	81,47/85,02	0,85/2,08	1,50/3,32	15,98/9,35	0,19/0,23	68,00/44,00
7	81,50/87,14	1,27/1,80	2,03/2,33	15,08/8,62	0,12/0,11	74,85/47,21	20	81,20/86,22	0,85/1,87	0,53/2,36	17,21/9,34	0,20/0,20	79,10/46,98
8	79,91/87,80	1,24/1,08	3,47/2,79	15,20/8,24	0,18/0,09	83,57/49,73	21	80,81/85,97	1,28/1,10	2,33/3,66	15,35/9,08	0,22/0,20	92,23/60,50
9	79,88/86,58	0,84/1,80	2,93/1,75	16,24/9,70	0,12/0,17	70,45/45,27	22	81,69/87,20	1,28/1,24	0,21/1,49	16,61/9,87	0,20/0,20	82,18/54,08
10	82,38/84,54	0,56/1,84	0,22/2,71	16,63/10,74	0,21/0,16	73,32/54,82	23	80,95/83,98	0,85/2,19	1,27/3,07	16,67/10,57	0,25/0,19	90,86/62,5
11	81,77/88,75	1,30/1,83	1,29/1,70	15,52/7,61	0,13/0,12	92,17/49,74	24	81,80/84,11	0,86/1,61	0,54/2,90	16,61/11,19	0,20/0,18	70,36/52,72
12	80,57/87,54	0,74/1,68	3,38/1,86	15,16/8,79	0,15/0,14	76,13/47,69	25	79,51/83,46	0,83/2,31	2,92/2,53	16,52/11,49	0,22/0,20	77,53/57,75
13	81,30/86,59	1,28/2,12	1,81/2,30	15,46/8,85	0,15/0,14	83,86/51,47							

* Числитель – расчет, знаменатель – опыт.

* Numerator – research, denominator – experience.

тилен – воздух, ацетилен – оксид азота (I), пропан (бутан) – оксид азота (I) и метилацетилен – воздух // Журнал аналитической химии. 1992. Т. 47. № 8. С. 1278 – 1292.

7. Толеуова А.Р. Фазовый анализ диаграммы Al-Cu-Mn-Zr с использованием программы Thermo-Calc // Вестник КазНТУ. 2011. № 3 (85). С. 187 – 192.
8. Ловшенко Г.Ф. Термодинамическое моделирование фазовых превращений при реакционном механическом легировании композиций на основе меди // Вестник Белорусско-Российского университета. 2006. № 1. С. 130 – 137.
9. Девяткин П.Н. Современные возможности определения равновесного состава многокомпонентных химических систем // Вестник МГТУ. 2010. Т. 13. № 4/2. С. 899 – 901.
10. Пупышев А.А., Васильева Н.Л, Музгин В.Н. Термодинамическое моделирование термохимических процессов в дуговом разряде с испарением вещества пробы из электрода // Журнал аналитической химии. 1997. Т. 52. № 6. С. 615 – 628.
11. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1976. – 269 с.
12. Белов Г.В., Трусов Б.Г. Термодинамическое моделирование химически реагирующих систем. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. – 96 с.
13. Трусов Б.Г. Программная система ТЕРРА для моделирования фазовых и химических равновесий в плазмохимических системах // III Междунар. симпозиум по теоретической и прикладной плазмохимии: Сб. матер. Т. 1. – Иваново, 2002. С. 217 – 220.
14. Протодьяконов М.М., Тедер Р.И. Методика рационального планирования экспериментов. – М.: Наука, 1970. – 76 с.
15. Беляев С.В., Малышев В.П. Пути развития вероятностно-детерминированного планирования эксперимента // Комплексная переработка минерального сырья Казахстана. Состояние, проблемы, решения. – В 10-ти томах. Т. 9: Информационные технологии в минерально-сырьевом комплексе. Глава 8. – Алматы, 2008. С. 599 – 633.
16. Малышев В.П. Особенности экстраполяции и ограничения уравнения Протодьяконова // Вестник АН КазССР. 1982. № 2. С. 43 – 47.
17. Ким В.А., Надырбеков А.К., Ли А.М. и др. Технологии получения и использования спецкокса из шубаркольских углей //

Тр. Междунар. науч.-практич. конф., посвященной 40-летию КарМетИ «Научно-технический прогресс в металлургии»: Сб. науч. Тр. КГИУ. – Темиртау, 2000. С. 156 – 158.

18. Назаров Б.К., Акбердин А.А. Термодинамический анализ системы B_2O_3-CaO-SiO_2-Al_2O_3 // Известия АН СССР. Металлы. 1986. № 6. С. 61– 63.

19. Isagulov A., Akberdin A., Sultangaziyev R. etc. Diagram of equilibrium phase composition of Fe–C–Si–B system // Croatia Croatian Metalurgical Society Metalurgija. 2016. No. 3 (55). P. 305 – 308.

20. Омесь Ю.Н., Вихлевщук В.А., Кекух А.В. и др. Технология микролегирования стали карботермическим ферробором // Металлургическая и горнорудная промышленность. 1999. № 4. С. 40 – 43.

Поступила 22 мая 2018 г.

Izvestiya VUZov. Chernaya Metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy. 2018. Vol. 61. No. 9, pp. 737–742.

PLANNING OF NUMERICAL AND PHYSICAL EXPERIMENT IN SIMULATION OF TECHNOLOGICAL PROCESSES

A.A. Akberdin, A.S. Kim, R.B. Sultangaziev

Chemical-Metallurgical Institute named after Zh. Abishev, Karaganda, Republic of Kazakhstan

Abstract. Technological processes are multifactorial. The choice of the most significant of them for the correct analysis of the object of research is an important task. For such a ranking of factors, researchers usually rely on their own experience or the opinions of specialists in this field, assessing their consistency in terms of mathematical criteria. However, when developing a new process, this approach can not be used. In this case, experimental methods of selecting factors are preferable. But the cost, duration, and sometimes impossibility of using this method is obvious. In this paper we use a different approach. It was considered that thermodynamic modeling is an experiment, but only numerical. Therefore, you can apply it to the method of mathematical design of the experiment, allowing for one calculation to take into account the effect on the objective function of more than a dozen factors. The partial dependencies of the process indices obtained in this case make it possible, without setting up physical experiments, to weed out insignificant factors and leave strong ones, estimating them by the methods of mathematical statistics. Another important advantage of its application is the ability to evaluate the dynamics of changes in phase and elementary products of smelting, process feasibility according to convection and temperature conditions with the control of and mathematical criterion of the acquired data. The method also allows the process to be controlled by all the factors involved, which cannot be met in everyday modeling. For demonstration, this approach was applied during the development of the ferroborone production technology by carbothermic method using local raw materials. Thermodynamic modeling was performed using pre-selected factors. They were also used in physical simulation of the process in a high-temperature furnace. The experiment confirmed significance of the factors, which were chosen theoretically. The use of the planning method also reduced the number of numerical experiments in 25, and physical – in 125 times for predefined data.Using this approach, the authors have made it possible to compare the obtained data with the results of physical experiment to develop measures to approximate practical results to equilibrium ones with the use of strongly acting factor.

Keywords: thermodynamic and physical modeling, factor, experiment planning, regression equations, correlation coefficient, coefficient of determination.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-9-737-742

REFERENCES

1. Andersson J.O., Helander T., Höglund L., Shi P.F., Sundman B. Thermo-Calc and DICTRA, Computational tools for materials science. *Calphad*. 2002, vol. 26, pp. 273–312.

2. Trusov B.G. *Modelirovanie khimicheskikh i fazovykh ravnovesii pri vysokikh temperaturakh (ASTRA.4). Versiya 1.06* [Modeling of chemical and phase saturation at high temperatures (ASTRA4). Version 1.06]. Moscow: MGTU im. Baumana, 1991, 37 p. (In Russ.).

3. Belov G.V. *Termodinamicheskoe modelirovanie: metody algoritmy, programmy* [Thermodynamic modeling: methods, algorithms, programs]. Moscow: Nauchnyi Mir, 2002, 186 p. (In Russ.).

4. Vatolin N.A., Moiseev G.K., Trusov B.G. *Termodinamicheskoe modelirovanie v vysokotemperaturnykh neorganicheskikh sistemakh* [Thermodynamic modeling in high-temperature inorganic systems]. Moscow: Metallurgiya, 1994, 352 p. (In Russ.).

5. Moiseev G.K., Vyatkin G.P. *Termodinamicheskoe modelirovanie v neorganicheskikh sistemakh* [Thermodynamic modeling in inorganic systems]. Chelyabinsk: Izd-vo Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta, 1999, 256 p. (In Russ.).

6. Pupyshev A.A., Muzgin V.N., Vasil'eva N.L. Thermodynamic modeling of atomization of elements in acetylene-air flames, acetylene-nitrogen oxide (I), propane (butane) -nitrous oxide (I) and methyl acetylene-air. *Zhurnal analiticheskoi khimii*. 1992, vol. 47, no. 8, pp. 1278–1292. (In Russ.).

7. Toleuova A.R. Phase analysis of the Al-Cu-Mn-Zr diagram using Thermo-Calc program. *Vestnik KazNTU*. 2011, no. 3(85), pp. 187–192. (In Russ.).

8. Lovshenko G.F. Thermodynamic modeling of phase transformations during reaction mechanical alloying of copper-based compositions. *Vestnik Belorussko-Rossiiskogo universiteta*. 2006, no. 1, pp. 130–137. (In Russ.).

9. Devyatkin P.N. Modern possibilities of determining the equilibrium composition of multicomponent chemical systems. *Vestnik MGTU*. 2010, vol. 13, no. 4/2, pp. 899–901. (In Russ.).

10. Pupyshev A.A., Vasil'eva N.L, Muzgin V.N. Thermodynamic simulations of thermochemical processes in an arc discharge with vaporization of a sample material from the electrode. *Journal of Analytical Chemistry*. 1997, vol. 52, no. 6, pp. 548–561.

11. Adler Yu.P., Markova E.V., Granovskii Yu.V. *Planirovanie eksperimenta pri poiske optimal'nykh uslovii* [Planning an experiment when searching for optimal conditions]. Moscow: Nauka, 1976, 269 p. (In Russ.).

12. Belov G.V., Trusov B.G. *Termodinamicheskoe modelirovanie khimicheski reagiruyushchikh system* [Thermodynamic modeling of chemically reacting systems]. Moscow: MGTU im. N.E. Baumana, 2013, 96 p. (In Russ.).

13. Trusov B.G. TERRA software system for modeling phase and chemical equilibria in plasma chemical systems. In: *3-i mezhdunarodnyi simpozium po teoreticheskoi i prikladnoi plazmokhimii. Sb. materialov* [3rd Int. Symposium on Theoretical and Applied Plasma Chemistry. Collection of materials]. Vol. 1. Ivanovo, 2002, pp. 217–220. (In Russ.).

14. Protod'yakonov M.M., Teder R.I. *Metodika ratsional'nogo planirovaniya eksperimentov* [Methods of experiments rational planning]. Moscow: Nauka, 1970, 76 p. (In Russ.).

15. Belyaev S.V., Malyshev V.P. Ways of development of the probabilistic-deterministic experiment planning. In: *Kompleksnaya pererabotka mineral'nogo syr'ya Kazakhstana. Sostoyanie, problemy, resheniya. V 10-ti t. T. 9: Informatsionnye tekhnologii v mineral'no-*

syr'evom komplekse [Integrated processing of mineral raw materials in Kazakhstan. Status, problems, solutions. In 10 vols. Vol. 9: Information technologies in the mineral and raw materials complex]. Almaty, 2008, pp. 599-633. (In Russ.).

16. Malyshev V.P. Peculiarities of extrapolation and limitation of the Protodyakonov equation. *Vestnik AN KazSSR*. 1982, no. 2, pp. 43–47. (In Russ.).

17. Kim V.A., Nadyrbekov A.K., Li A.M., Nurmukhanbetov Zh.U., Kudarinov S.Kh. Technologies for obtaining and using special coke from Shubarkol coals. In: *Trudy mezhdunar. Nauchno-prakt. konf., posv. 40-letiyu KarMetI. Nauchno-tekhnicheskii progress v metallurgii: sb. nauch. Tr. KGIU* [Proc. of Sci.-Pract. Conf. referred to the 40th Anniversary of KarMetI. Scientific and technical progress in metallurgy: Coll. of Sci.Works of KGIU]. Temirtau, 2000, pp. 156–158. (In Russ.).

18. Nazarov B.K., Akberdin A.A. Thermodynamic analysis of the system B_2O_3-CaO-SiO_2-Al_2O_3. *Russian Metallurgy (Metally)*. 1986, no. 6, pp. 61–63. (In Russ.).

19. Isagulov A., Akberdin A., Sultangaziyev R., Kim A., Kulikov V., Isagulova D. Diagram of equilibrium phase composition of Fe–C–Si–B system. *Croatia Croatian Metalurgical Society Metalurgija*. 2016, no. 3 (55), pp. 305–308.

20. Omes' Yu.N., Vikhlevshchuk V.A., Kekukh A.V., Borovikov G.F., Gasik M.I., Rudenko V.K. Technology of microalloying of steel with carbothermic ferroboron. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'*. 1999, no. 4, pp. 40–43. (In Russ.).

Information about the authors:

A.A. Akberdin, *Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Laboratory "Boron"*

A.S. Kim, *Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher of the Laboratory "Boron"*

R.B. Sultangaziev, *PhD, Senior Researcher of the Laboratory "Boron"* (sulrus83@mail.ru)

Received May 22, 2018