

**ТОРАЙҒЫРОВ УНИВЕРСИТЕТІНІҢ  
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ**

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ  
ТОРАЙҒЫРОВ УНИВЕРСИТЕТА**

---

**ҚАЗАҚСТАН ҒЫЛЫМЫ  
МЕН ТЕХНИКАСЫ**

2001 ЖЫЛДАН БАСТАП ШЫҒАДЫ



**НАУКА И ТЕХНИКА  
КАЗАХСТАНА**

ИЗДАЕТСЯ С 2001 ГОДА

ISSN 2788-8770

№ 4 (2021)

---

ПАВЛОДАР

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ  
ТОРАЙГЫРОВ УНИВЕРСИТЕТ**  
выходит 1 раз в квартал

---

**СВИДЕТЕЛЬСТВО**

о постановке на переучет периодического печатного издания,  
информационного агентства и сетевого издания  
№ KZ51VPY00036165

выдано  
Министерством информации и общественного развития  
Республики Казахстан

**Тематическая направленность**

Публикация научных исследований по широкому спектру проблем  
в области металлургии, машиностроения, транспорта, строительства,  
химической и нефтегазовой инженерии, производства продуктов питания

**Подписной индекс – 76129**

<https://doi.org/10.48081/PIZZ2271>

**Импакт-фактор РИНЦ – 0,342**

---

Абишев Кайратолла Кайроллинович – к.т.н., профессор (главный редактор);  
Касенов Асылбек Жумабекович – к.т.н., профессор (заместитель главного редактора);  
Мусина Жанара Керейовна – к.т.н., профессор (ответственный секретарь);  
Шокубаева Зауреш Жанатовна – технический редактор.

**Члены редакционной коллегии:**

Калиакпаров Алтай Гиндуллинович – д.т.н., профессор (Нур-Султан, Казахстан);  
Клецель Марк Яковлевич – д.т.н., профессор (Павлодар, Казахстан);  
Шеров Карибек Тагаевич – д.т.н., профессор (Караганда, Казахстан);  
Богомоллов Алексей Витальевич – к.т.н., ассоц. профессор (Павлодар, Казахстан);  
Кажыбаева Галия Тулеуевна – к.т.н., профессор (Павлодар, Казахстан);

**Зарубежные члены редакционной коллегии:**

Waigang Sun – профессор (Пекин, Китай);  
Gabriele Comodi – PhD, профессор (Анкона, Италия);  
Jianhui Zhao – профессор (Харбин, Китай);  
Khamid Mahkamov – д.т.н., профессор (Ньюкасл, Великобритания);  
Magin Laruerta – д.т.н., профессор (СьюДад Реал, Испания);  
Mareks Mezitis – д.т.н., профессор (Рига, Латвия);  
Petr Bouchner – PhD, профессор (Прага, Чехия);  
Ronny Berndtsson – профессор (Лунд, Швеция);  
Барзов Александр Александрович – д.т.н., профессор (Москва, Россия);  
Витвицкий Евгений Евгеньевич – д.т.н., профессор (Омск, Россия);  
Иванчина Эмилия Дмитриевна – д.т.н., профессор (Томск, Россия);  
Лазарев Владислав Евгеньевич – д.т.н., профессор (Челябинск, Россия);  
Мягков, Леонид Львович – д.т.н., профессор (Москва, Россия);  
Янюшкин Александр Сергеевич – д.т.н., профессор (Чебоксары, Россия);  
Ребезов Максим Борисович – д.с/х.н., профессор (Москва, Россия).

---

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели  
Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов  
При использовании материалов журнала ссылка на журнал «Наука и техника Казахстана» обязательна

© Торайгыров университет

**Р. Т. Төлеуқадыр<sup>1</sup>, \*С. Т. Габдуллин<sup>2</sup>,  
Е. Ж. Шабанов<sup>3</sup>, А. С. Байсанов<sup>4</sup>, Н. А Сәлімгерей<sup>5</sup>**

Химико-металлургический институт имени  
Ж. Абишева, Республика Казахстан, г. Караганда

### **ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЫПЛАВКИ ФЕРРОСИЛИКОМАРГАНЦА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА «TERRA»**

*В Республике Казахстан актуальным вопросом является развитие технологических процессов производства ферросплавов из местного сырья (руд и восстановителей).*

*В статье приведено термодинамическое моделирование карботермического процесса выплавки ферросиликомарганца с использованием программного комплекса «TERRA».*

*В основе программного комплекса «TERRA» использован метод полного термодинамического моделирования (ПТМ) металлургических процессов, который для анализа углетермического взаимодействия дополнен термодинамически-диаграммным методом построения концентрационных треугольников Гиббса.*

*Для термодинамических расчетов выплавки ферросиликомарганца был также использован метод полного термодинамического моделирования металлургических процессов (ПТМ) в программном комплексе «TERRA», основанный на принципе максимума энтропии и учитывающий все известные свойства реагирующих компонентов, составляющих термодинамическую систему.*

*В результате исследований были установлены основные конденсированные и газовые фазы ( $C$ ,  $Fe_3C$ ,  $Mn$ ,  $Mn_3Si_3$ ,  $Mn_7C_3$ ,  $Fe_3Si$ ,  $FeSi$ ,  $MnO$ ,  $Mn_2SiO_4$ ,  $Mg_2SiO_4$ ,  $MgAl_2O_4$ ,  $Ca_3Si_2O_7$ ,  $Ca_3Al_2O_6$ ,  $Ca_3P_2O_8$ ,  $MgO$ ). С помощью комплексной программы «TERRA» были установлены зависимости составов конденсированных металлических и шлаковых фаз от температуры процесса, нами были изучены образование, переход и удаление различных фаз.*

*Проведенные исследования могут быть использованы для определения температуры плавления металла и восстановления при выплавке различных марок ферросплавов.*

*Ключевые слова: ферросиликомарганец, конденсированные фазы и газовые фазы, термодинамический анализ, термодинамическое моделирование.*

#### **Введение**

Технология выплавки ферросиликомарганца является рациональным способом переработки бедных марганцевых руд Казахстана. Она исключает обогащение руд, что дает возможность ускорить организацию производства марганцевых сплавов. Ферросиликомарганец – комплексный раскислитель, широко используемый при выплавке стали в кислородных конверторах, электрических печах.

### Материалы и методы

Для выплавки ферросиликомарганца используются различные виды восстановителей в частности – кокс, различные виды полукокса и низкочольные марки угля. Основными требованиями к восстановителям является их низкая зольность, высокая пористость и реакционная способность, а также высокая структурная прочность. По содержанию золы восстановители должны содержать низкое количество вредных примесей (сера, фосфор) и иметь благоприятный состав основных составляющих компонентов золы. Производимый в настоящее время ферросиликомарганец в условиях Аксуского завода ферросплавов (ТНК «Казхром», г. Аксу), ТОО «ТЭМК» (г. Темиртау) и ТОО «SAT Energy» (г. Тараз) выплавляется с использованием металлургического кокса фракции 10-25 мм и добавок каменного угля экибастузского и карагандинского угольных бассейнов. Частичная замена кокса углем способствует существенному снижению себестоимости получаемого сплава. Максимальное количество добавок угля взамен кокса составляет не более 50 % по углероду. Превышение этого количества резко ухудшает технологический процесс выплавки ферросиликомарганца. Это связано с низкой пористостью угля и его адсорбционной способностью. Использование в виде добавки каменные угли содержит до 45 % золы и до 20 % летучих компонентов на сухую массу. Зольная часть этих углей представлена в основном соединениями кремния и алюминия, являющимися тугоплавкими соединениями и позволяющими выплавлять сплав с гарантированным содержанием кремния. Повышенное содержание оксида алюминия в составе золы играет положительную роль при выплавке, обеспечивая некоторое повышение температуры плавления шлака при оптимальных вязко-текучих характеристиках [1–3].

Технический анализ восстановителей и химические составы шихтовых материалов представлены в таблице 1. В соответствии с требованием смесь шихтовых материалов была рассчитана на 100% всех компонентов, соединений и элементов.

Таблица 1 – Технический анализ восстановителей и химические составы шихтовых материалов

Материал	Содержание, %									
	A <sup>c</sup>	V <sup>c</sup>	W	C						
Уголь	38,1	25,0	1,7	36,9						
Кокс	13,76	2,34	0,5	83,9						
Материал	Химический состав, %									
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>			
Зола угля	63,3	31,36	3,1	0,8	0,1	0,089	0,9			
Зола кокса	56,00	18,00	14,03	6,00	3,50	0,50	0,08			
Материал	Содержание, %									
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	ППП			
Доломит	1,73	1,38	0,60	30,88	19,52	0,07	45,10			
Кварцит	96,57	0,80	0,70	0,40	0,40	0,02	-			
Материал	Содержание, %									
	Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	S	ППП	W
Марганец	69,65	5,69	7,66	3,39	2,41	0,20	0,01	0,09	10,62	1,00

Расчет термодинамического равновесия произвольных многокомпонентных систем заключается в определении всех равновесных параметров, термодинамических свойств, а также химического и фазового состава. При достаточно высокой температуре, когда любые изменения состояния сопровождаются фазовыми, полиморфными и химическими превращениями, эта задача неизмеримо более сложна, чем в постановке классической термодинамики. Однако благодаря тому, что фундаментальные термодинамические законы остаются справедливыми для любых систем, их правильное применение позволяет решить задачу расчета термодинамического равновесия в общем случае. Рассмотрение в рамках единого подхода существенно различающихся процессов и состояний возможно только при известной формализации модельного описания изучаемых объектов. Любая рассматриваемая термодинамическая система будет характеризоваться относительным и абсолютным содержанием в ней химических элементов (моль/кг). По условию оно остается неизменным при установлении равновесия от произвольного состояния и является достаточным для описания системы, как материального объекта [4–6].

Для анализа углетермического взаимодействия использован метод полного термодинамического моделирования (ПТМ) металлургических процессов, реализованный в компьютерной системе – ПК «TERRA» с дополнением его термодинамически-диаграммным методом построения концентрационных треугольников Гиббса [6–7]. Для термодинамических расчетов выплавки ферросиликомарганца был использован метод полного термодинамического моделирования металлургических процессов (ПТМ) в программном комплексе «TERRA», основанный на принципе максимума энтропии и учитывающий все известные свойства реагирующих компонентов, составляющих термодинамическую систему. Программный комплекс «TERRA» разработан в МГТУ им. Баумана и адаптирован для расчета равновесий в многокомпонентных металлургических системах Институтом металлургии УрО РАН. В соответствии с методикой расчетов в качестве равновесного признается состав, отвечающий условию максимума энтропии изолированной системы.

Равновесное состояние описывается составом системы (в молях, кг, мас. %, парциальных давлениях) и набором шести термодинамических параметров системы:

- 1) общим давлением  $P$ , атм;
- 2) температурой  $T$ , °С;
- 3) объемом  $V$ , м<sup>3</sup>;
- 4) полной внутренней энергией  $U$ , Дж;
- 5) полной энтальпией  $I$ , Дж;
- 6) энтропией  $S$ , Дж/К.

Все остальные характеристики рассчитываются по известным термодинамическим соотношениям. Исходными данными для расчета являются:

- исходный состав системы (при восстановлении руд – это состав шихты);
- два из шести перечисленных выше параметров, например,  $P=1$  атм,  $T=1873$ К;

- температурные зависимости полной энтальпии  $I$  и энтропии  $S$  индивидуальных веществ (эти сведения заложены в базу термодинамических данных комплекса «TERRA»). Полное термодинамическое моделирование (ПТМ) для выплавки ферросиликомарганца проведено в интервале температур 1200–2400 °C и при давлении  $P = 0,1$  мПа.

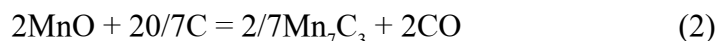
На основании проведенных расчетов построены два рисунка, показывающие степень зависимости составов конденсированных металлических и шлаковых фаз для выплавки ферросиликомарганца (рисунки 1,2) от температуры.

Анализ кривых, представленных на рисунке 1, показывает, что образование и некоторые изменения содержания состава конденсированных фаз при выплавке ферросиликомарганца происходят в температурном интервале 1200–2400°C. Содержание фаз C (рисунок 1) в интервале температур 1200–1300°C увеличивается с 8 % до 18,8 %, а затем имеет значение стабильное до температуры 1600°C и после чего с дальнейшим ростом температуры эта фаза исчезает, расходуясь на образование карбидов [8–9].

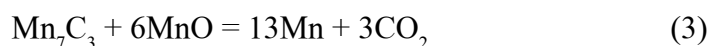
По реакции (1) по мере увеличения температуры, содержание карбида железа ( $k^*Fe_3C$ ) повышается, составляя при  $T = 1300$  °C – 10,47.



Карбид марганца ( $k^* Mn_7C_3$ ), образующийся по реакции (2) появляется при температуре 1400°C, составляя 100 %, с дальнейшим ростом температуры он исчезает. Это объясняется интенсивностью процесса разложения углеродсодержащих фаз с повышением температуры.



За счет разложения карбида марганца по реакции (3) появляется восстановленный Mn (37,6 % при температуре 2400 °C), однако, при температуре 1700 °C его концентрация снижается до 16,67 %, что согласуется с высокой упругостью пара марганца и имеющим место улетом марганца в газовую фазу, особенно это заметно при лабораторных опытах. Параллельно с марганцем в конденсированную фазу переходит фаза  $Mn_5Si_3$  со средним содержанием 6,36 %, которая также образуется при температуре 1600 °C и при 2100 °C доходит до 18,20 % [10].



Конденсированные фазы  $Fe_3Si$ ,  $FeSi$  при интервале температур 2100–2300 °C увеличивает свое содержание до 37,13 % и 50,98 % соответственно.

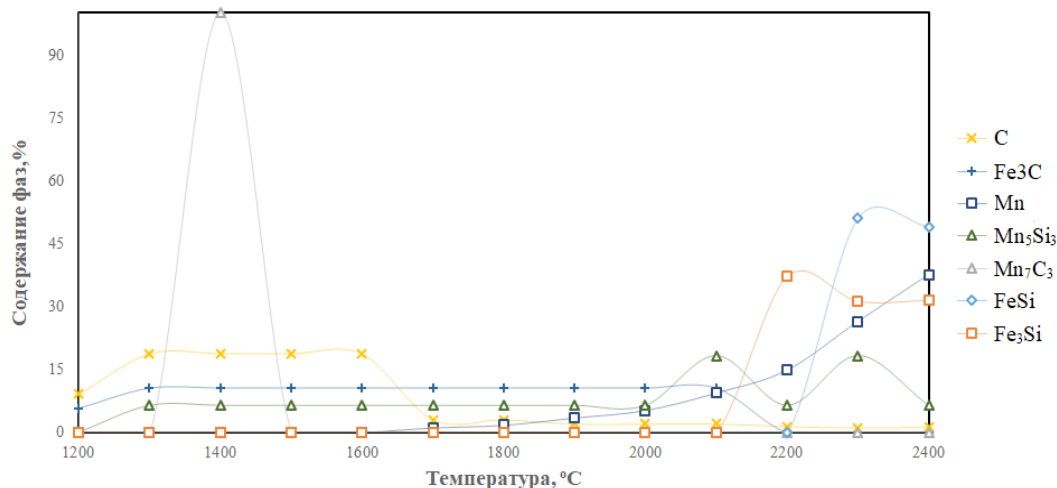


Рисунок 1 – Зависимость состава конденсированной металлической фазы от температуры

Анализ данных представленных на рисунке 2 также выявляет интересную картину образования и разложения следующих конденсированных фаз:  $MnO$ ,  $Mn_2SiO_4$ ,  $Mg_2SiO_4$ ,  $MgAl_2O_4$ ,  $Ca_3Si_2O_7$ ,  $Ca_3Al_2O_6$ ,  $Ca_3P_2O_8$ , и  $MgO$ .

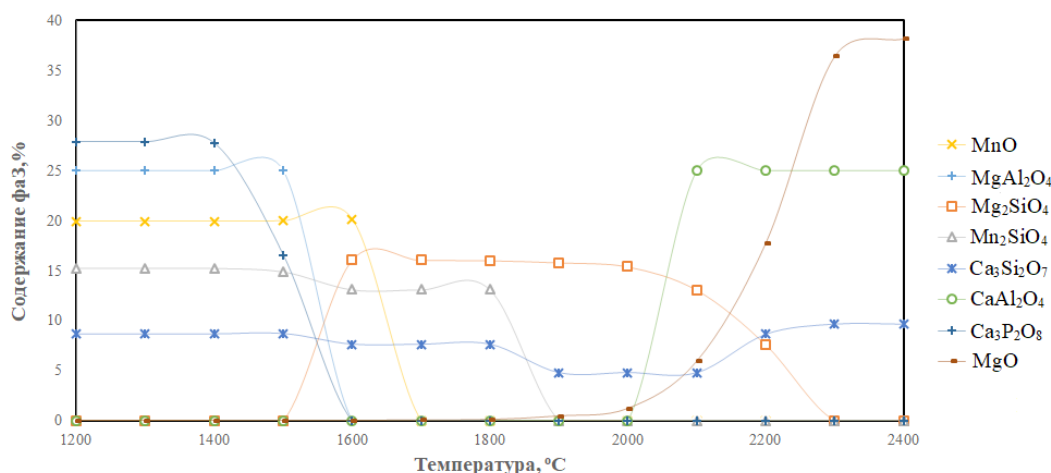


Рисунок 2 – Зависимость состава конденсированной шлаковой фазы от температуры

**Результаты и обсуждение**

Как видно, данные конденсированные фазы представляют собой промежуточные соединения, состоящие в основном из силикатов и алюминатов марганца, кальция и магния, т.е. эти фазы представляют собой основу образующегося шлака. Представленные фазы при изменении температуры в интервале температур 1200–2400 °C претерпевают качественные и количественные изменения:

- содержание оксида марганца ( $MnO$ ) в интервале температур 1400–1500 °C незначительно повышается с 27,86 % до 27,70 %, далее, при повышении температуры до 1600 °C,

- содержание данной фазы приближается к нулю;

- содержание силиката марганца ( $Mn_2SiO_4$ ) стабильно растет при температурах 1600–1700 °C с 13 до 13,11 %. Выше 1800 °C наблюдается резкое падение его содержания. При температуре 1900 °C данная фаза исчезает;

- концентрация алюмината магний ( $MgAl_2O_4$ ) сохраняется на уровне 25 % в интервале температур 1400–1600 °C. Выше температур 1600 °C наблюдается снижение содержания этой фазы с ее исчезновением;

- фосфат кальция ( $Ca_3P_2O_8$ ) существует только при температуре 1200–1400 °C и с повышением температуры исчезает;

- содержание силиката кальция ( $Ca_3Si_2O_7$ ) при температурах 1200–1400 °C имеют стабильную форму с содержанием 8,7 %, затем до температуры 2100 °C постепенно уменьшается до 4,7 %; а потом опять увеличивает свое содержание до 9,7%.

- алюминат кальция ( $Ca_3Al_2O_4$ ) появляется только при высоких температурах, начиная от 2000 °C с содержанием 25 %;

- оксид магния ( $MgO$ ) образуется только при температуре 1800 °C, далее с ростом температуры он увеличивается с содержанием до 38,20 %.

- концентрация форстерита ( $Mg_2SiO_4$ ) с температуры 1500 °C резко увеличивает свое содержание до 16,08 %, а затем постепенно уменьшается с увеличением температуры до 2100 °C с содержанием 13,06 % и с дальнейшим ростом температуры эта фаза исчезает.

Имеющиеся расхождения фазовому составу шлаковой фазы с расчетами, проведенными по балансовому методу связаны с учетом стабильности заданных соединений в зависимости от температуры.

### **Выводы**

Таким образом, нами проведено термодинамическое моделирование карботермического процесса выплавки ферросиликомарганца с использованием программного комплекса «TERRA». Установлены зависимости составов конденсированных металлических и шлаковых фаз от температуры процесса.

### **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1 Толымбеков, М. Ж., Байсанов, С. О. Состояние и перспективы развития ферросплавного производства Казахстана // Сталь. – М., 2007. – № 8. – С. 45–68.

2 Толымбеков, М. Ж., Байсанов, С. О., Привалов, О. Е., Осипова, Л. В. Состояние ферросплавного производства Казахстана и перспективы его развития // Сталь. – 2008. – № 8. – С. 47–51.

3 Мальцев, В. С., Ходак, Л. П. Труды Химико-металлургического института АН КазССР. – Выпуск № 1. – 1963. – С. 227.

4 Байсанов, С. О. Закономерности фазовых равновесий в металлургических системах и разработка на их основе эффективных технологий выплавки ферросплавов : Дисс. на соиск. уч. ст. докт. техн. наук. – Караганды, 2002. – 295 с.



5 **Синярев, Г. Б., Ватолин, Б. Г., Трусов, Б. Г., Моисеев, Г. К.** Применение ЭВМ для термодинамических расчетов металлургических процессов. – М. : Наука, 1982. – 263 с.

6 **Моисеев, Г. К., Вяткин, Г. П.** Термодинамическое моделирование в неорганических системах. – Челябинск : Изд-во ЮУрГУ, 1999. – 256 с.

7 **Симбинов, Р. Д., Малышев, В. П.** Термодинамическое, стехиометрическое и эксергетическое моделирование фазовых равновесий. – Алматы : Ылым, 1999, 100 с.

8 **Самуратов, Е. К., Байсанов, А. С., Толымбеков, М. Ж.** Изучение электросопротивления окискованных обжигмагнитных марганцевых концентратов и шихт на их основе // Республ. науч. журнал «Технология производства металлов и вторичных материалов». – Темиртау : КГИУ, 2009. – № 2 (16). – С. 12–17.

9 **Нурумгалиев, А. Х., Киекбаева, Е. Е.** Исследование кинетики совместного восстановления железа, марганца и хрома из концентратов // Караганда : Труды Университета. – 2008. – №1. – С. 20–23

10 **Акбердин, А. А.** Балансовый метод расчета равновесного фазового состава многокомпонентных систем // КИМС. – 1995. – № 3. – С. 92–93.

#### REFERENCES

1 **Tolymbekov, M. Zh., Baysanov, S. O.** Sostoianie i perspektivy razvitiia ferrosplavnogo proizvodstva Kazakhstana [State and prospects for the development of ferroalloy production in Kazakhstan] // Stal. – M., 2007 – № 8. – P. 45–68.

2 **Tolymbekov, M. Zh., Baysanov, S. O., Privalov, O. E., Osipova, L. V.** Sostoianie ferrosplavnogo proizvodstva Kazakhstana i perspektivy ego razvitiia [The state of ferroalloy production in Kazakhstan and prospects for its development]. – Stal. – 2008. – № 8. – P. 47–51.

3 **Maltsev, V. S., Khodak, L. P.** Trudy Khimiko-metallurgicheskogo inctituta AN KazCCR [Proceedings of the Chemical and Metallurgical Institute of the Academy of Sciences of the KazSSR]. – Issue 1. – 1963. – P. 227.

4 **Baysanov, S. O.** Zakonomernosti fazovykh ravnovecii v metallurgicheskikh cistemakh i razrabotka na ikh ocнове effektivnykh tekhnologii vyplavki ferrosplavov [The parity of phase equalities in metallurgical systems and the development on their basis of effective technologies for the production of ferroalloys] : Dicc. na coick. uch. ct. dokt. tekhn. nauk. – Karagandy, 2002. – 295 p.

5 **Siniarev, G. B., Vatin B. G., Trusov B. G., Moiseev G. K.** Primenenie EVM dlia termodinamicheskikh raschetov metallurgicheskikh protsessov [Computer application for thermodynamic calculations of metallurgical processes]. – Moscow : Nauka, 1982. – 263 p.

6 **Moiseev, G. K., Vyatkin, G. P.** Termodinamicheskoe modelirovanie v neorganicheskikh sistemakh [Thermodynamic modeling in inorganic systems]. – Cheliabinsk : Izd-vo IuUrGU, 1999. – 256 p.

7 **Simbinov, R.D., Malyshev, V.P.** Termodinamicheskoe, stekhiometricheskoe i eksergeticheskoe modelirovanie fazovykh ravnovesii [Thermodynamic, stoichiometric and exergy modeling of phase equilibria]. – Алматы : Fylym, 1999, 100 p.

8 **Samuratov, E. K., Baysanov, A. S., Tolymbekov, M. Zh.** Izuchenie elektrosoprotivleniia okuskovannykh obzhigmagnitnykh margantsevykh kontsentratorov i shikht na ikh osnove [Study of the electrical resistance of agglomerated fired manganese concentrates and mixtures based on them]. Respubl. nauch. zhurnal «Tekhnologiya proizvodstva metallov i vtorichnykh materialov». – Temirtau : KGIU, 2009. – № 2 (16). – P. 12–17.

9 **Nurumgaliev, A. Kh., Kiekbaeva, E. E.** Issledovanie kinetiki sovmestnogo vosstanovleniia zheleza, margantsa i khroma iz kontsentratorov [Study of the kinetics of combined reduction of iron, manganese and chromium from concentrates]. – Karaganda : Trudy Universiteta. – 2008. – № 1. – P. 20–23.

10 **Akberdin, A. A.** Balansovyi metod rascheta ravnovesnogo fazovogo sostava mnogokomponentnykh sistem. KIMS. – 1995. – № 3. – P. 92–93.

Материал поступил в редакцию 17.12.21.

**Р. Т. Төлеуқадыр<sup>1</sup>, \*С. Т. Габдуллин<sup>2</sup>, Е. Ж. Шабанов<sup>3</sup>, А. С. Байсанов<sup>4</sup>, Н. А Сәлімгерей<sup>5</sup>**

Ж. Абишева атындағы Химико-металлургиялық институт,  
Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.  
Материал баспаға 17.12.21 түсті.

### **«TERRA» БАҒДАРЛАМАЛЫҚ КЕШЕНІН ПАЙДАЛАНА ОТЫРЫП ФЕРРОСИЛИКОМАРГАНЕЦ БАЛҚЫТУ ҮРДІСІН ТЕРМОДИНАМИКАЛЫҚ МОДЕЛДЕУ**

*Қазақстан Республикасында өзекті мәселе жергілікті ишкізаттан (кендер мен қалпына келтірушілерден) ферроқорытпалар өндірісінің технологиялық процестерін дамыту болып табылады.*

*Мақалада «TERRA» бағдарламалық кешенін қолдану арқылы ферросиликомарганецті балқытудың карботермиялық процесін термодинамикалық модельдеу келтірілген.*

*«TERRA» бағдарламалық кешенінің негізінде Металлургиялық процестерді толық термодинамикалық модельдеу (ТТМ) әдісі пайдаланылды, ол Углетермиялық өзара әрекеттесуді талдау үшін Гиббс концентрациялық үшбұрыштарын құрудың термодинамикалық-диаграммалық әдісімен толықтырылды.*

*Ферросиликомарганецті балқытудың термодинамикалық есептеулері үшін максималды энтропия принципіне негізделген және термодинамикалық жүйені құрайтын реактивті компоненттердің барлық белгілі қасиеттерін ескеретін «Терра» бағдарламалық кешеніндегі Металлургиялық процестерді (ПТМ) толық термодинамикалық модельдеу әдісі қолданылды.*

*Зерттеу нәтижесінде негізгі конденсирленген және газ фазалары ( $C$ ,  $Fe_3C$ ,  $Mn$ ,  $Mn_5Si_3$ ,  $Mn_7C_3$ ,  $Fe_3Si$ ,  $FeSi$ ,  $MnO$ ,  $Mn_2SiO_4$ ,  $Mg_2SiO_4$ ,  $MgAl_2O_4$ ,  $Ca_3Si_2O_7$ ,  $Ca_3Al_2O_6$ ,  $Ca_3P_2O_8$ ,  $MgO$ ) орнатылды. «TERRA» кешенді бағдарламасының көмегімен конденсацияланған металл және қож фазалары құрамының процесс*

температурасына тәуелділігі анықталды, біз әртүрлі фазалардың пайда болуы, ауысуы және жойылуы зерттелді.

Жүргізілген зерттеулер әртүрлі маркалары ферроқорытпаларды балқыту кезінде металдың балқу температурасын және тотықсыздануын анықтау үшін қоданылуы мүмкін.

Кілтті сөздер: ферросиликомарганец, конденсирленген фазалар және газды фазалар, термодинамикалық талдау, термодинамикалық моделдеу.

**R. T. Toleukadyr<sup>1</sup>, \*S. T. Gabdullin<sup>2</sup>, Ye. Zh. Shabanov, A. S. Baisanov, N. A. Salimgerei**

Zh. Abishev Chemical and Metallurgical Institute,  
Republic of Kazakhstan, Karaganda.

Material received on 17.12.21.

### **THERMODYNAMIC MODELING OF THE PROCESS OF SMELTING FERROSILICOMANGANESE USING THE SOFTWARE COMPLEX «TERRA»**

*In the Republic of Kazakhstan, an urgent issue is the development of technological processes for the production of ferroalloys from local raw materials (ores and restorers).*

*The article presents thermodynamic modeling of the carbothermic process of smelting ferrosilicomanganese using the software package «TERRA».*

*The TERRA software package is based on the method of complete thermodynamic modeling (PTM) of metallurgical processes, which is supplemented by the thermodynamic-diagram method of constructing Gibbs concentration triangles for the analysis of coal-thermal interaction.*

*For thermodynamic calculations of ferrosilicon manganese smelting, the method of complete thermodynamic modeling of metallurgical processes (PTM) in the TERRA software package was also used, based on the principle of maximum entropy and taking into account all known properties of the reacting components that make up the thermodynamic system.*

*As a result of the research, the basic conformational and gas phases (C, Fe<sub>3</sub>C, Mn, Mn<sub>3</sub>Si<sub>3</sub>, Mn<sub>7</sub>C<sub>3</sub>, Fe<sub>3</sub>Si, FeSi, MnO, Mn<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>, Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>, MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, Ca<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>7</sub>, Ca<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>O<sub>6</sub>, Ca<sub>3</sub>P<sub>2</sub>O<sub>8</sub>, MgO) were established. Using the complex program «TERRA», the dependencies of the compositions of the condensed metal and slag phases on the process temperature were established, we studied the formation, transition, and removal of various phases.*

*Our research can be used to determine the melting point of the metal and the reduction in the smelting of various grades of ferroalloys.*

*Keywords: ferrosilicon manganese, condensed phases and gas phases, thermodynamic analysis, thermodynamic modeling.*

Теруге 17.12.21 ж. жіберілді. Басуға 27.12.21 ж. қол қойылды.  
Электрондық баспа  
5,07 Mb RAM  
Шартты баспа табағы 9,15 Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.  
Компьютерде беттеген: Е. Е. Калихан  
Корректор: А. Р. Омарова

Тапсырыс № 3875

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған  
Торайғыров университеті  
140008, Павлодар қ., Ломов көш., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы  
Торайғыров университеті  
140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.  
67-36-69

e-mail: kereku@tou.edu.kz  
nitk.tou.edu.kz