

**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

№ 1 (2022)

---

**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/TFZY8989>

**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

<https://doi.org/10.48081/KNZZ6329>

**Е. Ж. Шабанов<sup>1</sup>, Д. Р. Мұздыбаев<sup>2</sup>, А. С. Байсанов<sup>3</sup>,**

**А. К. Жакудаева<sup>4</sup>, \*Р. Т. Төлеуқадыр<sup>5</sup>**

<sup>1,2,3,4,5</sup>Химико-металлургический институт имени Ж. Абишева,  
Республика Казахстан, г. Караганда

### **АНАЛИЗ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ ВЫПЛАВКИ КРЕМНИЙ-АЛЮМИНИЙ- ХРОМОВОГО ФЕРРОСПЛАВА, ВЫПОЛНЕННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА «ТЕРРА»**

*В статье приведены результаты термодинамических исследований выплавки кремний-алюминий-хромового ферросплава с применением программного комплекса «ТЕРРА» (ПК «Терра»).*

*В основе программного комплекса «TERRA» использован метод полного термодинамического моделирования (ПТМ) металлургических процессов.*

*Процесс выплавки комплексного сплава алюмосиликохрома (ФАСХ – железо, алюминий, кремний, хром) является одностадийным и бесшлаковым, который заключается в полном восстановлении оксидов минеральной части угля. Зола угля, состоящая преимущественно из кремнезема (до 55–60 %) и глинозема (до 30–33 %) являлась источником кремния и алюминия в сплаве.*

*В результате исследований были установлены основные существующие конденсированные и газовые фазы ( $\text{CaSiO}_3$ ,  $\text{C}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{SiO}_5$ ,  $\text{Fe}_3\text{C}$ ,  $\text{SiC}$ ,  $\text{Cr}_5\text{Si}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CrSi}$ ,  $\text{CaAlO}_4$ ,  $\text{CrSi}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{Cr}$ ,  $\text{Si}$ ,  $\text{Al}$ ,  $\text{Fe}$ ). С помощью комплексной программы «ТЕРРА» были определены составы металлической, шлаковой и газовой фазы и подтверждены их температурные изменения.*

*Таким образом, с помощью ПК «Терра» нами были изучены образование, переход и удаление разных фаз, которые в сумме составляет состав полученного металла из исследуемых материалов.*

*Данные исследования также могут служить источником для определения температуры восстановления и плавления металла при выплавке различных марок ферросплавов.*

*Ключевые слова: термодинамический анализ, конденсированные фазы, газовые фазы, термодинамическое моделирование, алюмосиликохром, высокозольный уголь, программный комплекс, термодинамический исследования.*

#### **Введение**

Процесс выплавки комплексного сплава алюмосиликохрома (ФАСХ – железо, алюминий, кремний, хром) является одностадийным и бесшлаковым. Способ получения ФАСХ заключается в полном восстановлении оксидов

минеральной части угля. Такой метод ведения плавки способствует высокому использованию компонентов шихты, а применение низкосортных дешевых высокозольных углей позволяет получить сплав с низкой себестоимостью, а также повысить качество сплава путем стабилизации хода процесса и повышения производительности печи за счет высокого электросопротивления применяемого угля, обеспечивающего глубокую посадку электродов плавильной печи. Зола угля, состоящая преимущественно из кремнезема (до 55–60 %) и глинозема (до 30–33 %) является источником кремния и алюминия в сплаве [1–3].

#### **Материалы и методы**

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, 5].

Для анализа углетермического взаимодействия использован метод полного термодинамического моделирования (ПТМ) металлургических процессов, реализованный в компьютерной системе – ПК «ТЕРРА» [6]. Для термодинамических расчетов выплавки алюмосиликохрома (ФАСХ) был использован метод полного термодинамического моделирования металлургических процессов (ПТМ) в программном комплексе «ТЕРРА», основанный на принципе максимума энтропии и учитывающий все известные свойства реагирующих компонентов, составляющих термодинамическую систему. Программный комплекс «ТЕРРА» 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);
- набором шести термодинамических параметров системы: 1) общим давлением  $P$ , атм; 2) температурой  $T$ , К; 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, которые используются во всех современных исследованиях [7–15]. 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 «ТЕРРА»).

Для установления оптимального температурного режима плавки алюмосиликохрома было проведено компьютерное моделирование указанного процесса с применением программного комплекса «ТЕРРА». В основе программы заложен метод полного термодинамического анализа (ПТА), основанный на принципе максимума энтропии и учитывающий все известные свойства реагирующих компонентов, составляющих термодинамическую систему [7]. В качестве исходного объекта был выбран процесс выплавки алюмосиликохрома с применением высокозольных углей и хромитого металлоконцентрата, а параметры процесса – температура, давление и химический состав шихты – практически соответствовали параметрам реального процесса. Полное термодинамическое моделирование (ПТМ) для выплавки алюмосиликохрома проведено в интервале температур 1000–2500 °С с шагом 100 °С и при давлении  $P = 0,1$  МПа. Количество углерода для восстановления ведущих компонентов рассчитано постехиометрии [8].

Технический анализ и химические составы золы высокозольного угля, месторождения «Борлы» кварцита и хромитого металлоконцентрата представлены в таблице 1. В соответствии с требованием смесь шихтовых материалов была рассчитана на 100 % всех компонентов, соединений и элементов.

Состав шихты был следующий: борлинский высокозольный уголь – 100 кг, кварцит – 20 кг, хромитовый металлоконцентрат – 35 кг.

Графики изменения состава различных конденсированных фаз представлены на рис. 1–2.

Анализ кривых из графика, представленного на рисунке 1, показывает образования, и некоторые изменения содержания состава конденсированных фаз при плавке алюмосиликохрома происходящих в температурном интервале 1000–2500 °С. Из графика видно, что концентрация некоторых конденсированных фаз в интервале температур 1000–1500 °С имеет стабильное содержание, потом резко уменьшается и исчезает. К вышеназванным фазам относятся: субоксид кремния  $\text{SiO}_2$  (15,93 %), карбид хрома  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  (16,91 %), а также графит  $\text{C}$  (19,35 %).

Таблица 1 – Технический анализ и химический состав золы высокозольного угля, кварцита и хромитового металлоконцентрата

Материал	Содержание компонентов, мас., %						
	Технический анализ						
Высокозольный уголь месторождения «Борлы»	A <sup>c</sup>		V <sub>лет</sub>			C	
	59,2		16,89			23,5	
	Химический состав остатка золы						
	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
	2,3	73,78	21,52	0,58	0,34	0,1	0,34
Кварцит	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51
Хромитовый металлоконцентрат	Cr	Si	C		S		P
	61,59	61,59	61,59		61,59		61,59

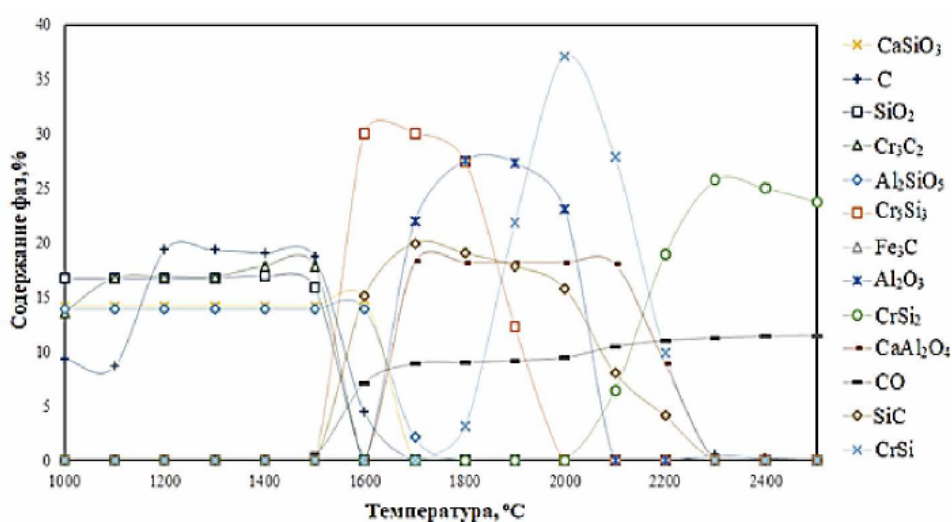


Рисунок 1 – Переход основных фаз в конденсированную фазу при увеличении температуры

Субоксид кремния образуется преимущественно при взаимодействии высшего оксида с кремнием. Однако протекание этой реакции возможно только при температуре выше 1713 °C. При этой температуре начинает плавиться кремнезем, и расплавленный оксид находится в более тесном контакте с кремнием в металле. Субоксид кремния образуется восстановлением кремнезема окисью углерода и при диссоциации кремнезема. Далее он вступает в реакцию с углеродом и образуется карбид (рисунок 1). Кроме того, карбид кремния образуется и непосредственно при восстановлении кремнезема углеродом. При температуре 1593 К возможно восстановление муллита. Удержание метасиликата кальция (CaSiO<sub>3</sub>) также, до 1500 °C имеет стабильное содержание и находится в пределах 13,98–14,85 %, затем температуре 1700 °C данная фаза полностью исчезает.

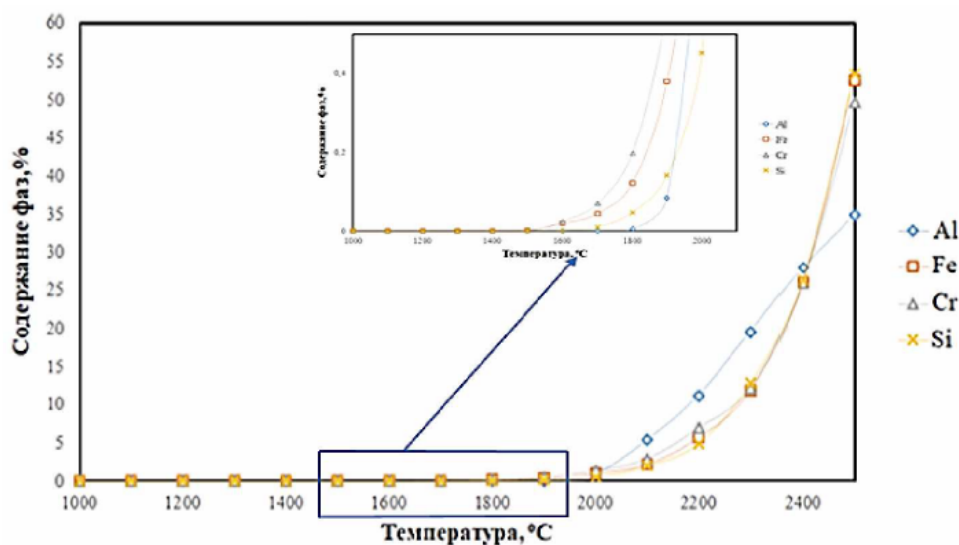
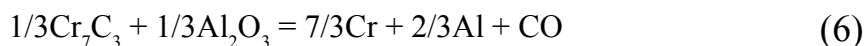
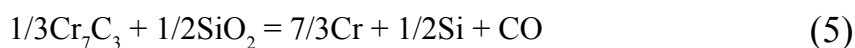
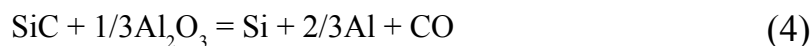
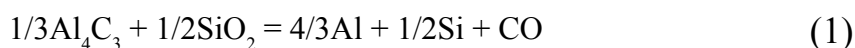


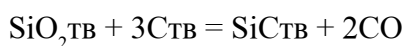
Рисунок 2 – График изменения содержания компонентов от температуры при выплавке алюмосиликохрома

При совместном восстановлении оксидов хрома, кремния и алюминия появляются факторы, которые облегчают процесс получения комплексного сплава алюмосиликохрома. Для определения взаимного влияния компонентов шихты и промежуточных продуктов процесса на ход восстановительной плавки целесообразно рассмотреть взаимодействие между карбидами SiC, C<sub>7</sub>C<sub>3</sub>, Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> и оксидами SiO<sub>2</sub> и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> по реакциям:



Интенсивное восстановление кремнезема (SiO<sub>2</sub>) углеродом начинается при температуре 1600 °C. В продуктах восстановления появляется кремний в виде карбидов (SiC, SiC<sub>2</sub>, Si<sub>2</sub>C).

Как видно из графика (рисунок 1), при температуре 1900 °C наблюдается резкий подъем кривой SiC и, наоборот, падение линии CO что указывает на осуществление следующей реакций:



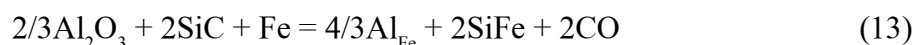
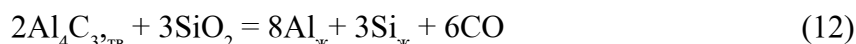
Далее с повышением температуры сохраняется продолжение реакции  $\text{SiO}_2^{\wedge} + \text{Ств} = \{\text{SiO}\} + \text{CO}$ , и обуславливает появление новых [9]:



При температуре 1600 °С помимо восстановления оксидов кремния и железа происходит восстановление глинозема ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )

Силикаты алюминия при высоких температурах начинают разлагаться на  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{SiO}_2$  или реагируют с углеродом. Такое же превращение будет претерпевать и минеральная часть углей, в которой содержится значительное количество каолинита ( $\text{Al}[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_8$ ).

Далее с повышением температуры выше 1800 °С идут реакции по следующей схеме:



Как видно из реакции (15), при повышенном содержании кремнезема в шихте карбид алюминия неустойчив и сразу взаимодействует с кремнеземом, при этом образуют кремнеалюминиевый сплав.

При восстановлении окиси алюминия углеродом образуется субоксид алюминия по реакциям [10,11]:



### Результаты и обсуждение

По результатам термодинамического анализа, проведенной в работе [12] следует, что образование  $\text{AlO}$  мало вероятно, что и подтверждается данными пГА. Появление  $\text{Al}_2\text{O}$ , наоборот, возможно наряду с образованием карбида и металлического алюминия.



Поскольку получение алюмосиликохрома - процесс высокотемпературный, то роль субоксидов в нем является существенной. Субоксид AlO менее прочен, чем CO, поэтому газообразный AlO в присутствии CO восстанавливается углеродом. Другой субоксид алюминия Al<sub>2</sub>O как соединение более прочное, чем CO, проходит через слой шихты невосстановленным и уходит с отходящими газами. Этим можно объяснить высокие потери алюминия при плавке алюмосиликохрома.

Из графика (рисунок 1) видно, что, в интервале температур 1500–2100 °С, все железо, восстановленный из золы угля и поступающий из отсевов в виде металлического железа сразу же переводится в более стабильное состояние - карбид железа (Fe<sub>3</sub>C), содержание которого к 2100 °С резко снижается за счет образования силицидов железа.

### **Выводы**

В связи со спецификой программы «ТЕРРА» элементарные кремний и алюминий отнесены к газовой фазе, вследствие их повышенной летучести при температурах более 1800 °С, поэтому авторами в соответствии с реальным процессом возгоняющиеся кремний и алюминий отнесены к конденсированной фазе образующегося сплава (рисунок 2). Стабильное увеличение содержания кремния и алюминия, при восстановлении их оксидов углеродом, в системе наблюдается после 1900 °С. Максимальное их содержание отмечено при температурах более 2500 °С и составляет Si 53,32 %; 34,89 % Al; 49,69 % Cr; 52,59 % Fe.

### **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1 **Шабанов Е., Байсанов С., Исагулов А., Байсанов А., Чекимбаев А., Жаксылыков Д.** Получение комплексного сплава алюмосиликохрома // Журнал «Промышленность Казахстана». – Алматы, 2013. – № 5. – С. 44–45.

2 **Шабанов Е.Ж., Байсанов С.О., Байсанов А.С., и др.** Термодинамическое моделирование процесса выплавки алюмосиликохрома из высокозольных углей // Материалы VIII междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых и студентов «Роль науки в реализации стратегии индустриально-инновационного развития Республики Казахстан». – Актобе, 2012. – С. 88–90.

3 **Шабанов Е. Ж.** Разработка технологии выплавки алюмосиликохрома из высокозольных углей карагандинского бассейна и отсевов высокоуглеродистого феррохрома : Дисс.на соиск. уч. степени доктора философии PhD. – Караганда, 2016. – 117 с.

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

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

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

7 Цветная металлургия капиталистических стран в 1965 г. – М. : Центральный научноисследовательский институт информации и технико-экономических исследований цветной металлургии, 1966. – 112 с.

8 **Нурумғалиев А. Х.** Моделирование и анализ в системе Al-O-C // Технология производства металлов и вторичных материалов. – Темиртау : КарМетИ, 2007, № 2 (12). – С. 67-72.

9 **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.

10 **Кожевников Г. Н.** К теории восстановления окиси алюминия углеродом: труды института металлургии и обогащения. – А4 КазССР, 1964. – Выпуск № 10.

11 **Белецкий М. С., Раппопорт М. В.** – ДАН СССР, 1951. – Т. 80. – № 5.

12 **Мальцев В. С., Ходак Л. П.** труды Химико-металлургического института А4 КазССР. – 1963. – Выпуск №1.

13 **Zhunusov A., Tolymbekova L., Abdulabekov Ye., Zholdubayeva Zh., Bykov P.** Agglomeration of manganese ores and manganese containing wastes of Kazakhstan // Metalurgija. – 60 (2021) 1–2. P. 101–103.

14 **Tolymbekova L. B., Kim A. S., Zhunusov A. K., Babenko A. A.** Thermal transformations in manganese ores in the zapadnyi kamys deposit and in charge materials used to produce pellets in an air flow under nonisothermal conditions // Metallurgist. – 2013. – 56(11-12). – P. 919–924.

15 **Kuatbay Y., Nurumgaliyev A., Shabanov Y., Gabdullin S., Zhuniskaliyev T.** Melting of high-carbon ferrochrome using coal of the saryadyr deposit // Metalurgija. – 2022. – 61(2). – P. 367–370.

## REFERENCES

1 **Shabanov E., Baykanov S., Isagulov A., Baykanov A., Chekimbaev A., Zhaksylykov D.** Poluchenie kompleknogo cplava aliumocilikoxpoma [Production of a composite alloys of aluminum silico] // Zhupnal «Promyshlennost Kazakhstana». – Almaty, 2013. – № 5. – P. 44–45.

2 **Shabanov Ye. Zh., Baysanov S. O., Baysanov A. C., et al.** Termodinamicheskoe modelirovanie protsessa vyplavki aliumosilikokhroma iz vysokozolnykh uglei [Thermodynamic modeling of the process of smelting aluminosilicochrome from high-ash coals] // Materialy VIII mezhdunar. nauch.-prakt. konf. molodykh uchenykh i studentov «Rol nauki v realizatsii strategii industrialno-innovatsionnogo razvitiia Respubliki Kazakhstan». – Aktobe, 2012. – P. 88–90.

3 **Shabanov Ye. Zh.** Razrabotka tekhnologii vyplavki aliumosilikokhroma iz vysokozolnykh uglei karagandinskogo basseina i otsevvov vysokouglerodistogo ferrokroma [Development of a technology for smelting aluminosilicochromium from high-ash coals of the Karaganda basin and screenings of high-carbon ferrochrome]. Diss.na soisk. uch. stepeni doktora filosofii PhD, Karaganda, 2016. – 117 p.

4 **Sinyarev G. B., Vatolin B. G., Trusov B. G., Moiseev G. K.** Primenenie EVM dlia termodinamicheskikh raschetov metallurgicheskikh protsessov [Computer application for thermodynamic calculations of metallurgical processes]. – M. : Nauka, 1982. – 263 p.

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

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

7 Tsvetnaia metallurgiiia kapitalisticheskikh stran v 1965 g. [Nonferrous metallurgy of capitalist countries in 1965]. – M. : Tsentralnyi nauchnoissledovatel'skii institut informatsii i tekhniko-ekonomicheskikh issledovaniy tsvetnoi metallurgii, 1966. – 112 p.

8 **Nurumgaliev A. Kh.** Modelirovanie i analiz v sisteme Al-O-C [Modeling and analysis in the Al-O-C system] // Tekhnologiiia proizvodstva metallov i vtorichnykh materialov. – Temirtau : KarMetI, – 2007. – № 2 (12). – P. 67-72.

9 **Baysanov S. O.** Zakonomernosti fazovykh ravnovesii v metallurgicheskikh sistemakh i razrabotka na ikh osnove effektivnykh tekhnologii vyplavki ferrosplavov [Regularities of phase equilibria in metallurgical systems and the development on their basis of effective technologies for smelting ferroalloys]. Diss. na soisk. uch. st. dokt. tekhn. nauk. – Karagandy, 2002. – 295 p.

10 **Kozhevnikov G. N.** K teorii vosstanovleniia okisi aliuminiia uglerodom : trudy instituta metallurgii i obogashcheniia [Towards the Theory of the Reduction of Aluminum Oxide by Carbon : Proceedings of the Institute of Metallurgy and Beneficiation]. – A4 KazSSR, 1964. – Vypusk № 10.

11 **Beletsky M. S., Rappoport M. V.** – DAN SSSR, 1951. – T. 80. – № 5.

12 **Maltsev V. S., Khodak L. P.** Proceedings of the Chemical and Metallurgical Institute A4 KazSSR. – 1963. – Vypusk № 1.

13 **Zhunusov A., Tolymbekova L., Abdulabekov Ye., Zholdubayeva Zh., Bykov P.** Agglomeration of manganese ores and manganese containing wastes of Kazakhstan // Metalurgija. – 60 (2021) 1–2. – P. 101–103.

14 **Tolymbekova L. B., Kim A. S., Zhunusov A. K., Babenko A. A.** Thermal transformations in manganese ores in the zapadnyi kamys deposit and in charge materials used to produce pellets in an air flow under nonisothermal conditions // Metallurgist. – 2013. – 56(11–12). – P. 919–924.

15 **Kuatbay Y., Nurumgaliev A., Shabanov Y., Gabdullin S., Zhuniskaliyev T.** Melting of high-carbon ferrochrome using coal of the saryadyr deposit // Metalurgija. – 2022. – 61(2). – P. 367–370.

Материал поступил в редакцию 17.03.22.

*Е. Ж. Шабанов<sup>1</sup>, Д. Р. Мұздыбаев<sup>2</sup>, А. С. Байсанов<sup>3</sup>,*

*А. К. Жақудаева<sup>4</sup>, \*Р. Т. Төлеуқадыр<sup>5</sup>*

<sup>1,2,3,4,5</sup>Ж. Әбішев атындағы Химия-металлургия институты,

Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.

Материал баспаға 17.03.22 түсті.

### **КРЕМНИЙ-АЛЮМИНИЙ-ХРОМ ФЕРРОКОРЫТПАСЫН БАЛҚЫТУДА ТЕРМОДИНАМИКАЛЫҚ ЕСЕПТЕУЛЕРДІ «ТЕРРА» БАҒДАРЛАМАЛЫҚ КЕШЕНІН ПАЙДАЛАНА ОТЫРЫП ТАЛДАУ**

*Мақалада «ТЕРРА» бағдарламасы көмегімен жүргізілген термодинамикалық зерттеулердің нәтижелері келтірілген. Зерттеу нәтижесі бойынша негізінен қолданыстағы конденсирленген және газ фазалары ( $\text{CaSiO}_3$ , C,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{C}_3\text{C}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{SiO}_5$ ,  $\text{Fe}_3\text{C}$ , SiC,  $\text{Cr}_5\text{Si}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , CrSi,  $\text{CaAl}_2\text{O}_4$ ,  $\text{CrSi}_2$ , CO, Cr, Si, Al, Fe) құрылды. Кешенді «ТЕРРА» бағдарламасы арқылы металлдық, қождық және газдық құрамды фазалары анықталды және олардың температураға байланысты өзгерістері бекітілді.*

*Осылайша, «ТЕРРА» бағдарламалық кешенінің көмегімен зерттелетін материалдардан алынатын металлдың құрамы жиынтық көлемінде құрастырылатын әртүрлі қызықты фазалардың өтпелілуін және жойылуын бізбен зерттелді. Бұл зерттеулерден алынған мәліметтер әртүрлі ферроқорытпалардың маркаларын балқыту кезінде тотықсыздану температурасын және балқу температурасын анықтауға мүмкіндік береді.*

*Кілтті сөздер: термодинамикалық талдау, конденсирленген фазалар, газ фазалар, термодинамикалық модельдеу, алюмосиликохром, жоғары көмір, бағдарламалық кешен, термодинамикалық зерттеулер.*

*Ye. Shabanov<sup>1</sup>, D. Muzdybaev<sup>2</sup>, A. Baisanov<sup>3</sup>, A. Zhakudaeyva<sup>4</sup>, \* R. Toleukadyr<sup>5</sup>*

<sup>1,2,3,4,5</sup>Zh. Abishev Chemical-Metallurgical Institute,

Republic of Kazakhstan, Karaganda.

Material received on 17.03.22.

### **ANALYSIS OF THE THERMODYNAMIC CALCULATIONS OF MELTING SILICON-ALUMINUM-CHROMIUM ALLOY, MADE WITH THE USE OF SOFTWARE COMPLEX «TERRA»**

*In the article are given the results of the thermodynamic experiments were incorporated in the TERRA document. The results of the research have been based on ocnovoynye quenching and gasification phases ( $\text{CaSiO}_3$ , C,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{C}_3\text{C}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{SiO}_5$ ,  $\text{Fe}_3\text{C}$ , SiC,  $\text{Cr}_5\text{Si}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , CrSi,  $\text{CaAl}_2\text{O}_4$ ,  $\text{CrSi}_2$ , CO, Cr, Si, Al, Fe). With the help of the TROMS program, the components of the metal, slag and gas phase were determined and confirmed by the temperature changes.*

*In this way, with the help of the program complex Terra we learned from the formation, transformation and removal of various interesting phases, which make up the sum of the composed metal of the studied material. It is also possible to find out how to heat the temperature and to improve the temperature of the ferroalloys.*

*Keywords: thermodynamic analysis, condensed phase, gas phase, thermodynamic modeling, aluminosilicochrome, high-ash coal, the software, thermodynamic studies.*

Теруге 17.03.22 ж. жіберілді. Басуға 27.03.22 ж. қол қойылды.

Электрондық баспа

15 Мб RAM

Шартты баспа табағы 14,5. Таралымы 300 дана.

Бағасы келісім бойынша.

Компьютерде беттеген: Е. Е. Калихан

Корректор: А. Р. Омарова

Тапсырыс № 3952

«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](mailto:kereku@tou.edu.kz)

<https://vestnik.tou.edu.kz/>

<http://stk.tou.edu.kz/>