

УДК 661.631.48:669.15-198

DOI: 10.18799/24131830/2024/1/4184

Шифр специальности ВАК: 05.17.01, 05.16.02

Термодинамическая картина взаимодействия смеси фосфоритов Каратау и Актобе с получением фосфора, карбида кальция и ферросилиция

В.М. Шевко¹, А.Д. Бадикова¹✉, Р.А. Утеева¹, Б.А. Лавров², Д.Д. Аманов¹

¹ Южно-Казахстанский университет им. М. Ауэзова, Казахстан, г. Шымкент

² Санкт-Петербургский государственный технологический институт, Россия, г. Санкт-Петербург

✉ sunstroke_91@mail.ru

Аннотация. *Актуальность* исследования связана с необходимостью увеличения комплексного использования фосфоритов при их электротермической переработке, а также с необходимостью уменьшения шлаковых отходов фосфорного производства, загрязняющих окружающую среду. **Цель:** проведение компьютерного термодинамического моделирования влияния температуры и количества железа на технологические показатели взаимодействия смеси фосфоритов бассейна Каратау и Актобе с углеродом и железом с получением фосфора, карбида кальция и ферросилиция. **Объекты:** фосфориты Каратауского и Актобинского фосфоритоносных бассейнов. **Методы:** термодинамическое компьютерное моделирование посредством использования программы HSC Chemistry 6.0; рототабельный метод планирования эксперимента второго порядка; геометрическая оптимизация технологических параметров. **Результаты.** Установлено, что в зависимости от температуры в смеси фосфоритов Каратау и Актобе с углеродом и железом во взаимодействии принимают участие: CaSiO_3 , SiO_2 , Si , SiC , $\text{SiO}_{(g)}$, MgSiO_3 , Al_2SiO_5 , Na_2SiO_3 , $\text{Ca}_{(g)}$, CaO , CaC_2 , CaF_2 , CaS , Fe , FeSi , FeSiO_3 , FeP , Fe_2P , Fe_3P , FeO , Fe_3Si ; $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, $\text{P}_{2(g)}$, $\text{P}_{4(g)}$. Увеличение количества железа приводит к повышению степени извлечения кремния в сплав, а при температуре 2000 °С понижает извлечение кальция в CaC_2 и концентрацию кремния в сплаве. Марочный карбид кальция литражом более 230 дм³/кг и ферросилиций марки FeSi25 образуются из смеси фосфоритов, углерода и железа при 2077...2088 °С в присутствии 20...21,4 % железа и 43 % углерода (при этом фосфор полностью отгоняется в газовую фазу). Предложенным нами методом электроплавки фосфоритов с отгонкой фосфора и попутным получением ферросплава, в сравнении с традиционным методом, показатель комплексного использования сырья увеличивается с 43,9 до 62,7...73,6 %, то есть в 1,43...1,67 раз. Предлагаемая технология переработки способствует увеличению активных запасов фосфоритов и вовлечению в сферу производства низкосортных фосфоритов Актобинского бассейна.

Ключевые слова: смесь фосфоритов, термодинамическое моделирование, рототабельное планирование, температура, углерод, железо, фосфор, карбид кальция, ферросилиций

Благодарности: Исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP14869066).

Для цитирования: Термодинамическая картина взаимодействия смеси фосфоритов Каратау и Актобе с получением фосфора, карбида кальция и ферросилиция / В.М. Шевко, А.Д. Бадикова, Р.А. Утеева, Б.А. Лавров, Д.Д. Аманов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 1. – С. 162–173. DOI: 10.18799/24131830/2024/1/4184

UDC 661.631.48:669.15-198
DOI: 10.18799/24131830/2024/1/4184

Thermodynamics of a Karatau and Aktobe phosphorites mixture interaction when producing phosphorus, calcium carbide and ferrosilicon

V.M. Shevko¹, A.D. Badikova^{1✉}, R.A. Uteyeva¹, B.A. Lavrov², D.D. Amanov¹

¹ M. Auezov South Kazakhstan University, Shymkent, Kazakhstan

² Petersburg State Institute of Technology, Saint Petersburg, Russian Federation

✉ sunstroke_91@mail.ru

Abstract. Relevance. The need to increase the level of comprehensive use of phosphorites during their electrothermal processing and to reduce the amount of slag waste generated during phosphorus production, polluting the environment. **Aim.** To conduct computer thermodynamic modeling of the effect of temperature and amount of iron on technological parameters of interaction of a Karatau and Aktobe phosphorites mixture with carbon and iron to produce phosphorus, calcium carbide and ferrosilicon. **Objects.** Phosphorites of the Karatau and Aktobe phosphorite-bearing basins. **Methods.** Thermodynamic computer modeling using the HSC Chemistry 6.0 software; rotatable second-order experiment planning technique; geometric optimization of technological parameters. **Results.** It has been established that depending on temperature in the mixture of Karatau and Aktobe phosphorites with carbon and iron, they participate in interaction: CaSiO_3 , SiO_2 , Si , SiC , $\text{SiO}_{(g)}$, MgSiO_3 , Al_2SiO_5 , Na_2SiO_3 , $\text{Ca}_{(g)}$, CaO , CaC_2 , CaF_2 , CaS , Fe , FeSi , FeSiO_3 , FeP , Fe_2P , Fe_3P , FeP_2 , FeO , Fe_3Si ; $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, $\text{P}_{2(g)}$, $\text{P}_{4(g)}$. An increase in iron amount leads to an increase in the degree of silicon extraction into the alloy, and at 2000°C reduces the extraction degree of calcium in CaC_2 and the silicon concentration in the alloy. Branded calcium carbide with a volume of more than 230 dm³/kg and ferrosilicon FeSi25 are formed from a mixture of phosphorites, carbon and iron at 2077...2088°C in the presence of 20...21.4% iron and 43% carbon (in this case, phosphorus is completely distilled off into the gas phase). Using our proposed method of electric smelting of phosphorites with phosphorus distillation and associated production of ferroalloy, in comparison with the traditional method, the indicator of integrated use of raw materials increases from 43.9 to 62.7...73.6%, that is 1.43...1.67 times. The proposed processing technology helps to increase active reserves of phosphorites and bring low-grade phosphorites of the Aktobe basin into production.

Keywords: mixture of phosphorites, thermodynamic modeling, rotatable planning, temperature, carbon, iron, phosphorus, calcium carbide, ferrosilicon

Acknowledgements: The research is funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (grant No. AP14869066).

For citation: Shevko V.M., Badikova A.D., Uteyeva R.A., Lavrov B.A., Amanov D.D. Thermodynamics of a Karatau and Aktobe phosphorites mixture interaction when producing phosphorus, calcium carbide and ferrosilicon. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 1, pp. 162–173. DOI: 10.18799/24131830/2024/1/4184

Введение

Казахстан располагает двумя крупными фосфоритоносными бассейнами: Каратауским (насчитывает около 45 месторождений), с запасами 3 млрд т (740 млн т P_2O_5), и Актобинским (3 основных крупных месторождения, главное – Чилисай), с запасами 5 млрд т (500 млн т P_2O_5) [1–3]. Фосфориты Каратау, содержащие до 22 % P_2O_5 , перерабатываются электротермическим способом с получением фосфора, из которого производят термическую ортофосфорную кислоту, фосфорные минеральные удобрения и кормовые фосфаты [4–8]. А фосфориты Актобинского бассейна, ввиду низкого содержания P_2O_5 (10...12 %), находятся в резерве и для производства фосфора не используются [9–11].

Получают фосфор в электропечах при температуре 1400...1500 °С. При электроплавке фосфор восстанавливается и переходит в газовую фазу. Нерудные составляющие шихты образуют шлак, выход которого составляет 10...12 т на каждую тонну фосфора [12]. Поэтому степень комплексного использования сырья при электроплавке фосфоритов невысокая. Предложенные новые технологии переработки фосфоритов с возгонкой фосфора: индукционный нагрев [13], плазменный нагрев [14], энерго-технологический агрегат [15], РОМЕЛТ-процесс [16], восстановление природным газом [17], алюминотермическое восстановление [18], не получили промышленного применения. Они ориентированы на повышение извлечения фосфора в

возгоны и сопряжены, тем не менее, с образованием шлака или высокой себестоимостью. Проблему повышения степени комплексного использования фосфоритов они не решают.

В Южно-Казахстанском университете им. М. Ауэзова ведется разработка технологии комплексной электротермической переработки фосфоритов [19–21] с одновременным получением в электропечи газообразного фосфора, карбида кальция и кремнийсодержащего сплава – ферросилиция, который в промышленности производится из кварцита, кокса и стальной стружки [22–25]. Разрабатываемая технология позволит значительно увеличить степень комплексного использования сырья, активные запасы фосфоритов и получать наряду с желтым фосфором карбид кальция и ферросплав.

В статье приводятся результаты компьютерного термодинамического моделирования влияния температуры и количества железа на технологические показатели взаимодействия смеси фосфоритов бассейна Каратау (месторождение Чулактау) и бассейна Актобе (месторождение Чилисай) (1:1) с углеродом и железом.

Материалы и методы

Исследования проводились при помощи программного комплекса HSC-6.0 [26]. По информации разработчиков программы очень трудно получить величину абсолютной ошибки расчета [27]. Тем не менее, исходя из того, что база данных ком-

плекса постоянно пересматривается и уточняются, расчетные функции комплекса HSC достаточно надежные, а результаты являются адекватными. В работе использовалась подпрограмма Equilibrium Compositions для расчета равновесия на основе принципа минимума энергии Гиббса. При работе с комплексом HSC-6.0 первоначальная информация представлялась в виде количественного (кг) распределения веществ в исследуемой системе. Затем по разработанному нами алгоритму [28] определялась равновесная степень распределения элемента (α , %) по продуктам взаимодействия. Степень комплексного использования сырья (γ) определялась по четырем элементам (P, Si, Fe, Ca) по уравнению (1):

$$\gamma = [\alpha(P) + \alpha(Fe) + \alpha(Si) + \alpha(Ca)]/4 \quad (1)$$

где $\alpha(P)$, $\alpha(Fe)$, $\alpha(Si)$, $\alpha(Ca)$ – соответственно, степень извлечения фосфора, железа, кремния и кальция в товарную продукцию, %.

Исследования проводились в температурном интервале 500...2200 °С и давлении 1 бар. Состав смеси фосфоритов Каратау и Актобе (1:1), мас. %: 37,7 Ca₃(PO₄)₂, 42,5 SiO₂, 7,8 CaO, 1,9 Al₂O₃, 1,8 Fe₂O₃, 2,5 CaF₂, 1,8 MgO, 2,1 CaSO₄, 0,3 N₂O, 0,2 TiO₂, 0,1 MnO, 1,3 CaCO₃. Количество углерода было постоянным и составляло 43 % от массы смеси фосфоритов (СФ). Количество железа в системах изменялось от 20 до 30 % от массы СФ.

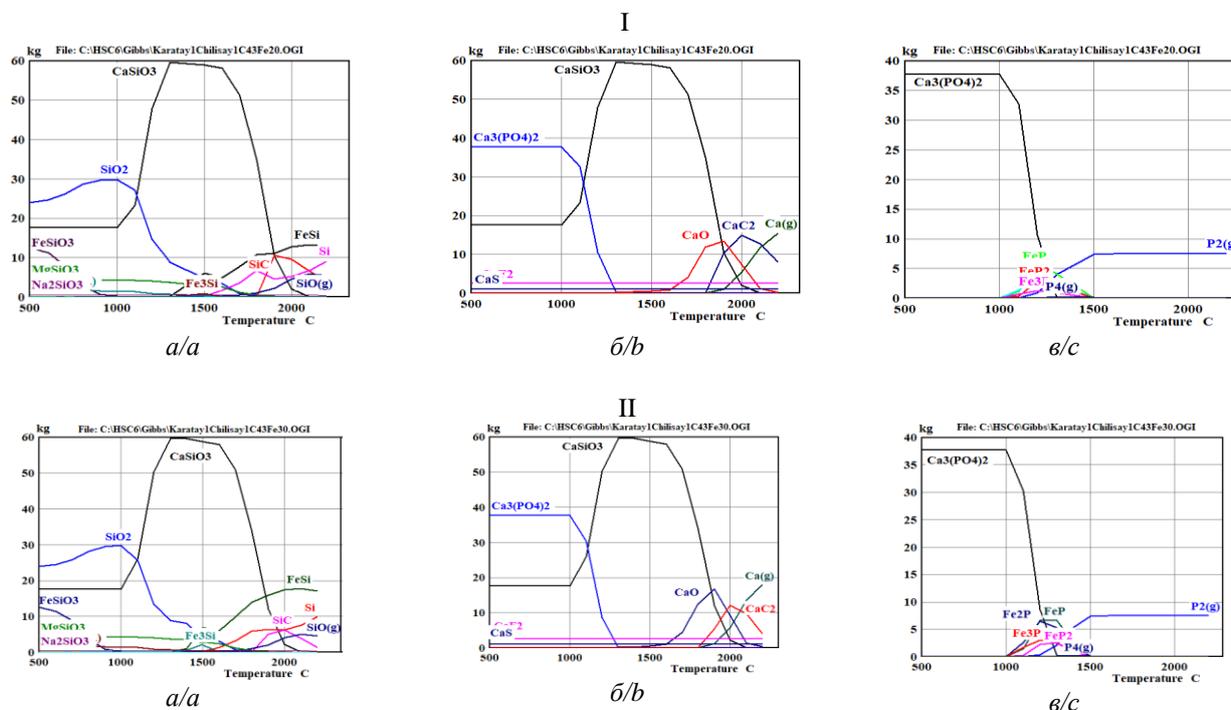


Рис. 1. Влияние температуры и железа на количественное распределение кремний- (а), кальций- (б), фосфорсодержащих (в) веществ в системе «СФ–углерод–железо» (количество железа в системе: I – 20%, II – 30%)

Fig. 1. Temperature and iron amount effect on the quantitative distribution of substances containing silicon- (a), calcium- (b), phosphorus-containing (c) in the system "mixture of phosphorites–carbon–iron" (amount of iron in the system: I – 20%, II – 30%)

Результаты и обсуждение

На рис. 1 приведена первичная графическая информация о влиянии температуры и железа на количественное (кг) распределение кремния, кальция и фосфора в рассматриваемых системах.

Установлено, что в зависимости от температуры и количества железа кремний в системе находится в виде: CaSiO_3 , SiO_2 , FeSi , FeSiO_3 , Si , SiC , SiO(g) , MgSiO_3 , Fe_3Si , Al_2SiO_5 , Na_2SiO_3 ; кальций в виде CaSiO_3 , $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, Ca(g) , CaO , CaC_2 , CaF_2 , CaS ; железо – Fe , FeSi , FeSiO_3 , FeP , Fe_2P , Fe_3P , FeP_2 , FeO , Fe_3Si ; фосфор – $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, $\text{P}_2(\text{g})$, FeP , Fe_2P , Fe_3P , FeP_2 , $\text{P}_4(\text{g})$.

На рис. 2, 3 показано влияние температуры на равновесную степень распределения кремния,

кальция и фосфора в системах с различным количеством железа.

Из рис. 2 видно, что силициды железа образуются при температуре более 1220°C , степень перехода кремния в $\text{FeSi}-\alpha\text{Si}(\text{FeSi})$ составляет 23,42 % при 1900°C . Переход $\alpha\text{Si}(\text{Si})$ наблюдается при температуре более 1300°C , возрастая до 46,04 % при 2200°C . При температуре более 1700°C $\alpha\text{Si}(\text{SiC})$ возрастает, достигая максимума (37,5 %) при 1900°C . Максимум перехода кальция в карбид кальция отмечается при 2000°C и составляет 41,45 %. Начиная с 1070°C фосфор переходит в газовую фазу, достигая 100 % при 1600°C . В температурном интервале от 1070 до 1390°C фосфор переходит в фосфиды железа.

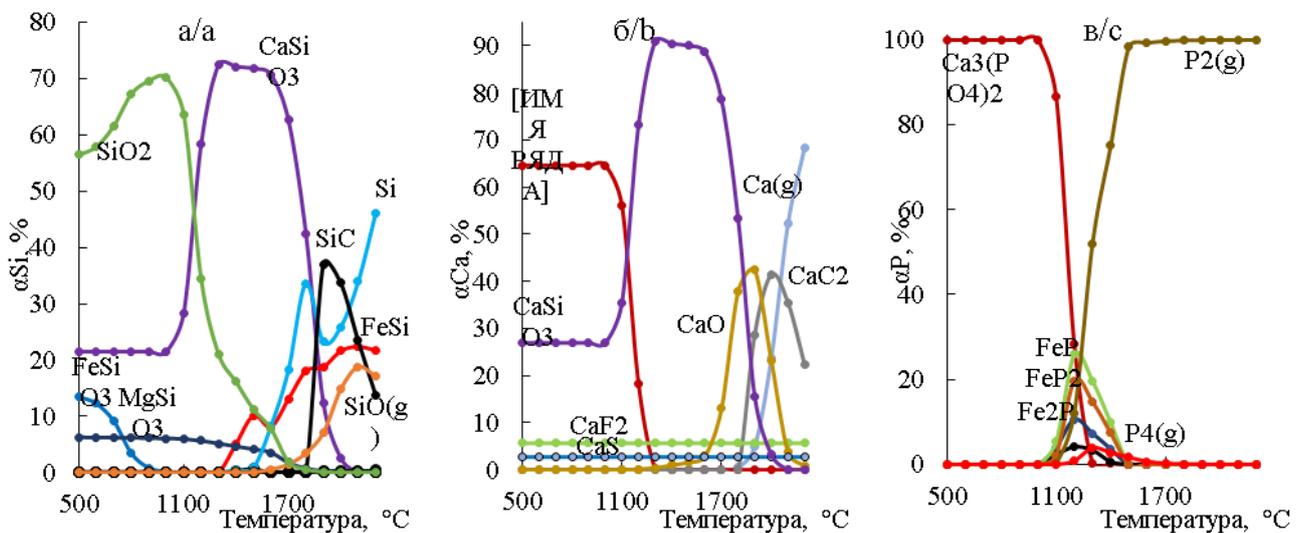


Рис. 2. Влияние температуры на равновесное распределение кремния (а), кальция (б), фосфора (в) в системе смесь «СФ–углерод–20 % железа»

Fig. 2. Temperature effect on the equilibrium distribution of silicon (a), calcium (b), phosphorus (c) in the system "mixture of phosphorites-carbon-20% iron"

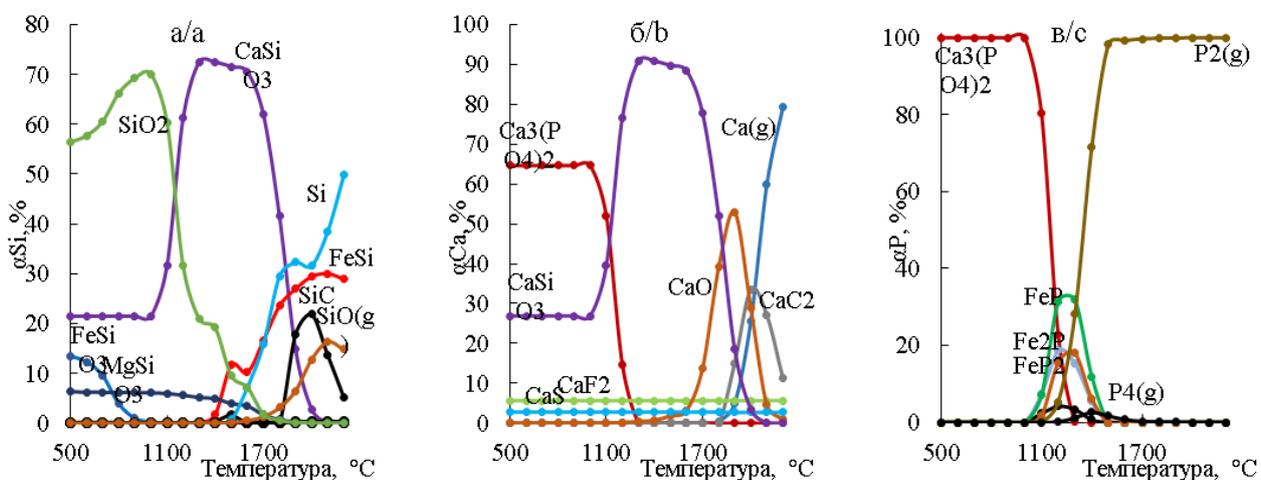


Рис. 3. Влияние температуры на равновесное распределение кремния (а), кальция (б), фосфора (в) в системе «СФ–углерод–30 % железа»

Fig. 3. Temperature effect on the equilibrium distribution of silicon (a), calcium (b), phosphorus (c) in the system "mixture of phosphorites-carbon-30% iron"

Из рис. 3 видно, что в температурном интервале 1300–2200 °С степень перехода кремния в элементное состояние увеличивается до 49,78 %. При температуре 1220 °С кремний переходит в FeSi, максимум этого перехода (30,03 %) отмечается при 2100 °С. Максимальный переход кремния в SiC (21,84 %) наблюдается при 2000 °С. При 1800–2000 °С степень перехода кальция в карбид кальция увеличивается и составляет 27,13 %. Фосфор переходит в

фосфиды железа в температурном интервале 1050...1400 °С. Степень перехода фосфора в газообразный фосфор увеличивается начиная с 1090 °С и достигает 100 % при 1600 °С.

На рис. 4 приведена информация о влиянии температуры и количества железа на степень извлечения кремния в сплав и кальция в карбид кальция. В табл. 1 показана степень извлечения фосфора в газовую фазу.

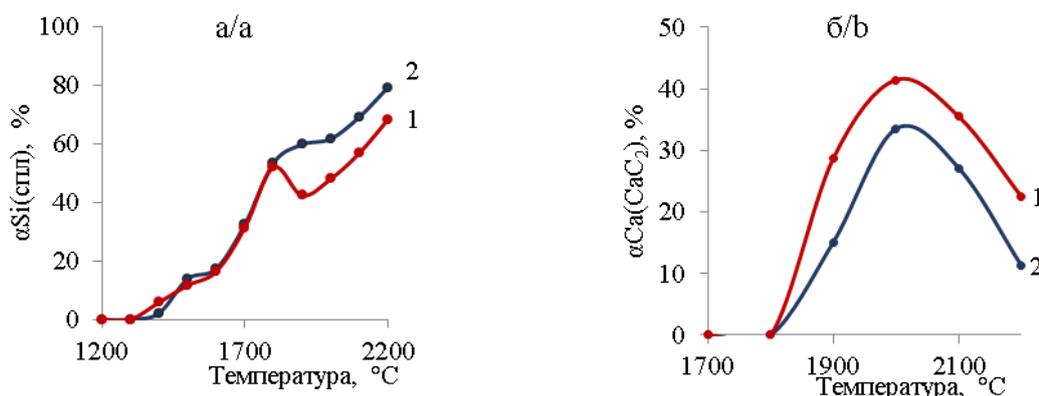


Рис. 4. Влияние температуры и количества железа на $\alpha Si_{(спл)}$ (а) и $\alpha Ca(CaC_2)$ (б) в системе «СФ–углерод–железо» (цифры у линий – количество железа: 1 – 20 %, 2 – 30 %)

Fig. 4. Temperature and iron amount effect on $\alpha Si_{(alloy)}$ (a) and $\alpha Ca(CaC_2)$ (b) in the system "mixture of phosphorites–carbon–iron" (numbers near the lines – iron amount: 1 – 20 %, 2 – 30 %)

Как следует из рис. 4, при температуре ≥ 1800 °С степень перехода кремния в сплав возрастает, а степень перехода кальция в карбид кальция уменьшается. При 1900 °С и 20 % железа степень перехода кремния в сплав составляет 42 %, при 30 % железа – 60 %. Максимум степени извлечения кальция в карбид кальция (41,4 %) наблюдается при 2000 °С и 20 % железа, а при 30 % железа – 37,5 %. Уменьшение $\alpha Ca(CaC_2)$ связано с разложением CaC_2 на газообразный кальций и сажистый углерод [12].

Из табл. 1 следует, что в температурном интервале 1100...1400 °С с увеличением количества железа в шихте степень извлечения фосфора в газ повышается. Затем количество железа на этот показатель не влияет.

На рис. 5 показано влияние температуры и железа на концентрацию кремния в сплаве, кальция в техническом карбиде кальция и его литраж.

Анализ рис. 5 показывает, что повышение количества железа приводит к уменьшению содержания кремния в сплаве и кальция в карбиде кальция. При 1800 °С и 20 % железа концентрация кремния в сплаве составляет 31,32 %, а при 30 % железа – 25,19 %. Содержание кальция в карбиде кальция при 2100 °С и 20 % железа составляет 63,13 %. Максимальный литраж технического карбида при 20 % железа составляет 234,85 дм³/кг.

С учетом установленного противоположного характера влияния железа на $\alpha Si_{(спл)}$, $CSi_{(спл)}$, $\alpha Ca(CaC_2)$ и литраж карбида, исследование по определению оптимальных равновесных параметров было проведено с использованием рототабельного планирования второго порядка [29]. Подобные работы по термодинамическому компьютерному моделированию в области сложных гетерогенных систем проводились неоднократно [30, 31].

Таблица 1. Влияние температуры и количества железа на степень извлечения фосфора в газ, %

Table 1. Effect of temperature and iron amount on degree of phosphorus extraction into gas, %

Количество железа, % Iron amount, %	Температура/Temperature, °C									
	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1800	2000	2200
20	0	0,39	13,00	55,81	77,91	99,99	100	100	100	100
30	0	0,15	5,41	29,42	74,14	99,99	100	100	100	100

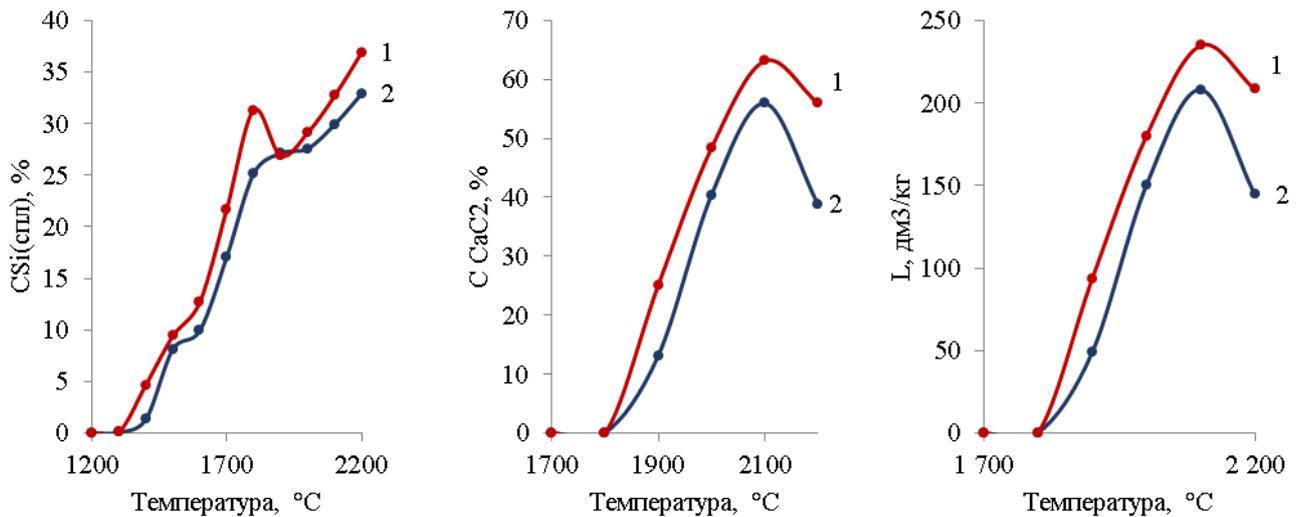


Рис. 5. Влияние температуры и количества железа на $CSI_{(снл)}$, % (а) $C Ca(CaC_2)$, % (б) и литраж карбида (в) в системе «СФ (1:1)–углерод–железо» (цифры у линий – количество железа: 1 – 20 %, 2 – 30 %)

Fig. 5. Effect of temperature and iron amount on $CSI_{(alloy)}$, % (a) $C Ca(CaC_2)$, % (b) and carbide capacity (c) in the system "mixture of phosphorites (1:1)–carbon–iron" (numbers near the lines – iron amount: 1 – 20 %, 2 – 30 %)

Согласно теории математического планирования исследований предварительно обозначается доверительный предел получаемых результатов. В нашем случае этот предел составляет 95 %, т. е. ошибка составляет не более 5 %. Адекватность результатов исследований со значениями, вычисленными по уравнениям (2)–(5), зависит от величин табличного и расчетного значения критерия Фишера. Если табличное значение критерия Фишера больше его расчетного, тогда уравнение адекват-

ное. Табличное значение критерия Фишера зависит от принимаемого исследователем уровня значимости параметра оптимизации. В нашем случае для уровня значимости (достоверности) 95 % критерий Фишера составляет 6,95.

В табл. 2 показана матрица планирования исследований и результаты влияния температуры (T , °C) и количества железа (Fe , %) на технологические параметры взаимодействия смеси фосфоритов с углеродом и железом.

Таблица 2. Матрица планирования исследований и их результаты

Table 2. Planning matrix and results of studies

Переменные/Variables				$\alpha Si_{(снл)}$ $\alpha Si_{(alloy)}$	$\alpha Ca(CaC_2)$ $\alpha Ca(CaC_2)$	$CSI_{(снл)}$ $CSI_{(alloy)}$	L , дм ³ /кг** L , dm ³ /kg**
Кодированный вид Coded appearance		Натуральный вид Natural appearance					
X1	X2	T, °C	Fe, %				
-1	-1	1929	21,5	45,5/45,71*	32,1/32,34	27,3/27,39	117,3/118,97
+1	-1	2071	21,5	56,1/56,40	36,8/36,98	31,5/31,55	226/223,28
-1	+1	1929	28,5	57,8/57,72	23,5/24,25	27,5/27,51	85,4/86,62
+1	+1	2071	28,5	64,3/64,30	32,2/32,89	29,5/29,45	208,1/204,9
+1,414	0	2100	25	63,62/63,44	31,32/30,89	31,77/31,78	222,6/226,45
-1,414	0	1900	25	51,28/51,22	22,01/21,51	27,52/27,46	71,38/69,03
0	+1,414	2000	30	61,68/61,77	33,54/32,72	27,59/27,63	150,17/151,3
0	-1,414	2000	20	48,02/47,69	41,45/41,34	29,13/29,04	186,67/187,1
0	0	2000	25	55,37/55,51	37,58/37,52	28,84/28,83	165,76/165,5
0	0	2000	25	55,9/55,51	37,9/37,52	28,7/28,83	166,7/165,47
0	0	2000	25	55,1/55,51	37,1/37,52	28,9/28,83	167,1/165,47
0	0	2000	25	55,5/55,51	37,8/37,52	28,81/28,83	163,5/165,47
0	0	2000	25	55,7/55,51	37,2/37,52	28,88/28,83	164,3/165,47

*числитель – выходные параметры по исследованию, знаменатель – по уравнениям (2)–(5)/numerator – output parameters for the study, denominator – according to equations (2)–(5); **литраж карбида кальция определялся в соответствии с [32] из выражения: $L=372 \cdot C/100$, где 372 – объем ацетилена, дм³/кг, образующийся из 1 кг чистого карбида кальция; C – концентрация CaC₂ в техническом карбиде/calcium carbide capacity was determined in accordance with [32] by the equation: $L=372 \cdot C/100$, where 372 is acetylene capacity, dm³/kg, formed from 1 kg of pure calcium carbide; C is the concentration of CaC₂ in technical carbide.

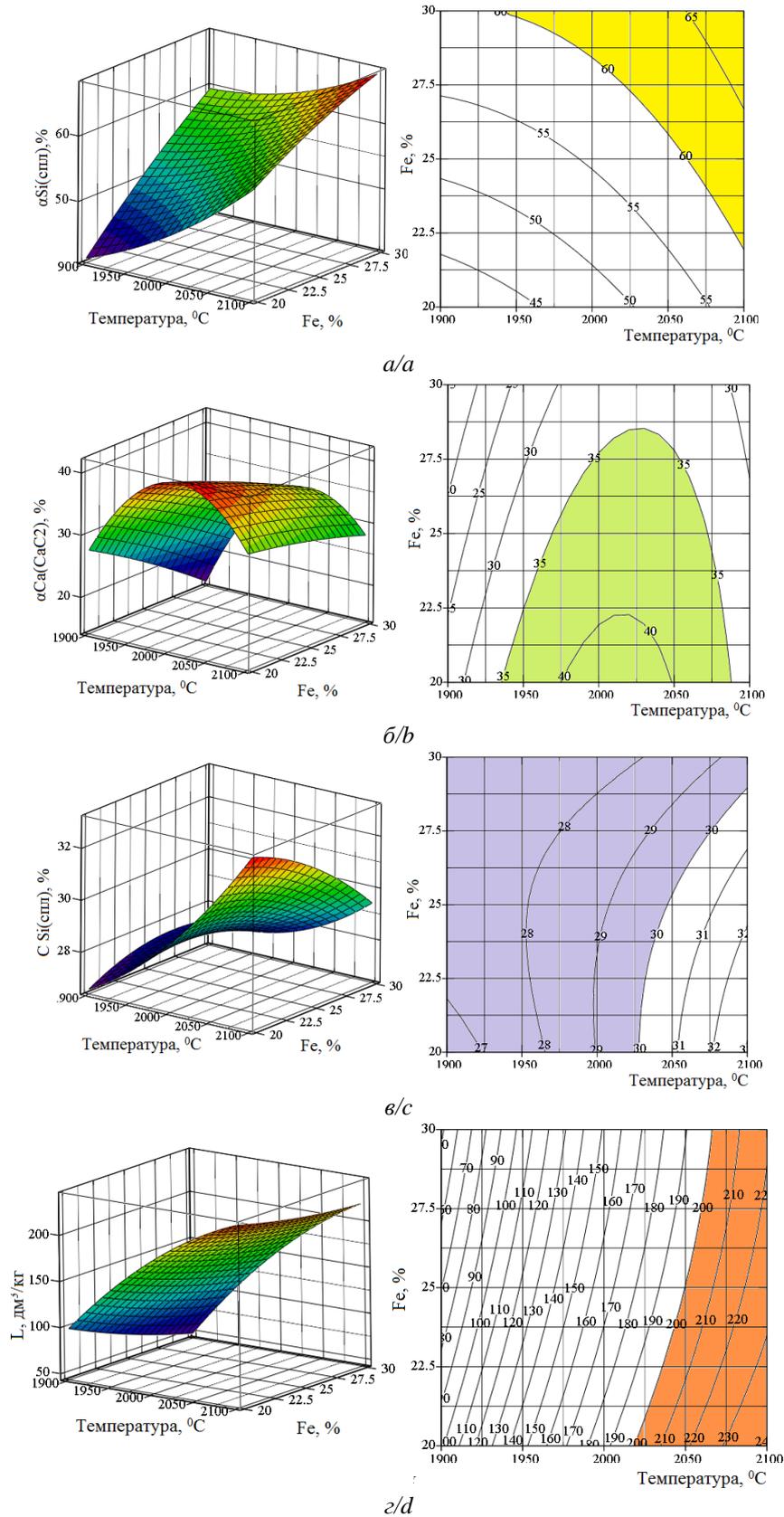


Рис. 6. Объемные и плоскостные изображения влияния температуры и количества железа на $\alpha Si_{(спл)}$ (а), $C Si_{(спл)}$ (б), $\alpha Ca(CaC_2)$ (в) и L , dm^3/kg (г)

Fig. 6. Three-dimensional and linear images of the effect of temperature and iron amount on $\alpha Si_{(alloy)}$ (a), $C Si_{(alloy)}$ (b), $\alpha Ca(CaC_2)$ (c) and L , dm^3/kg (d)

Используя результаты исследований (табл. 2) по [33] получены следующие уравнения регрессии:

$$\alpha_{Si_{(спл)}} = 395,155 - 0,559 \cdot T + 11,255 \cdot Fe + 1,807 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 - 0,0317 \cdot Fe^2 - 4,123 \cdot 10^{-3} \cdot T \cdot Fe; \quad (2)$$

$$\alpha_{Ca(CaC_2)} = -4334,446 + 4,435 \cdot T - 7,927 \cdot Fe - 1,122 \cdot 10^{-3} \cdot T^2 - 0,0198 \cdot Fe^2 + 4,024 \cdot 10^{-3} \cdot T \cdot Fe; \quad (3)$$

$$C_{Si_{(спл)}} = -180,392 - 0,237 \cdot T + 5,288 \cdot Fe + 7,856 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 - 0,0201 \cdot Fe^2 - 2,213 \cdot 10^{-3} \cdot T \cdot Fe; \quad (4)$$

$$L = -7543,527 + 7,462 \cdot T - 39,328 \cdot Fe - 1,758 \cdot 10^{-3} \cdot T^2 + 0,151 \cdot Fe^2 + 1,408 \cdot 10^{-2} \cdot T \cdot Fe. \quad (5)$$

Из табл. 2 видно, что разница между выходными параметрами результатов исследований и параметрами, рассчитанными по уравнениям (2)–(5), небольшая. Расчетное значение критерия Фишера для уравнения (2) составляет 1,03, для уравнения (3) – 5,92, для уравнения (4) – 1,5, и для (5) – 6,08. Поэтому все уравнения адекватные и погрешность исследований не превышает 5 %.

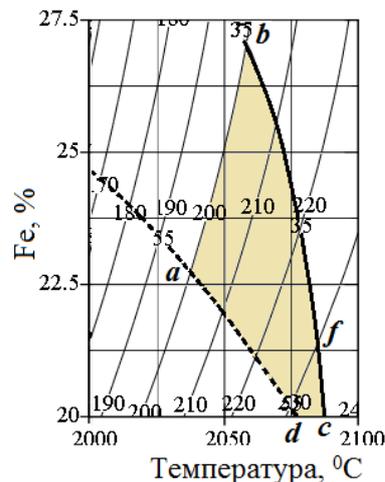
Объемные и плоскостные изображения влияния температуры и количества железа на $\alpha_{Si_{(спл)}}$, $CSi_{(спл)}$, $\alpha_{Ca(CaC_2)}$ и L , dm^3/kg , построенные на основе уравнений (2)–(5), показаны на рис. 6.

Из рис. 6 следует, что $\alpha_{Si_{(спл)}} \geq 60$ % наблюдается при 1934–2100 °С и 21,9...30 % железа, $\alpha_{Ca(CaC_2)}$ от 35 до 41,5 % – при 1935...2088 °С и 20...28,5 % железа, $CSi_{(спл)}$ – в области 1900...2100 °С в присутствии 20...30 % железа и $L \geq 200$ dm^3/kg – в области 2019...2100 °С в присутствии 20...30 % железа. Из сравнения влияния температуры и количества железа на технологические параметры видно, что минимальными значениями параметров характеризуется поведение кальция. Поэтому оптимизация должна проводиться с учетом необходимости $\alpha_{Ca(CaC_2)}$ и $L \rightarrow \max$. На рис. 7 показано плоскостное совмещение изображений поведения кремния и кальция с учетом $\alpha_{Si_{(спл)}} \geq 55$ %, $\alpha_{Ca(CaC_2)} \geq 35$ %, $L \geq 200$ dm^3/kg . В табл. 3 показаны значения технологических параметров в граничных точках области **abcd**.

Из табл. 3 видно, что карбид кальция третьей сортности образуется в области **cdf**, в которой при 2077,4...2088 °С и 20...21,25 % Fe литраж соответ-

ствует 230,0...235 dm^3/kg , $\alpha_{Si_{(спл)}} = 55,0...57,7$ %, $\alpha_{Ca(CaC_2)} = 35...36,7$ %, $CSi_{(спл)} = 32...32,5$ %. В этой области коэффициент комплексного использования сырья составляет 72,8–73,1 %.

В области **abfd** при 2037,5...2085 °С и 20...27,01 % Fe формируется карбид кальция литражом 200...230 dm^3/kg . При этом $\alpha_{Si_{(спл)}} = 55...61,9$ %, $\alpha_{Ca(CaC_2)} = 35...39,2$ %. Коэффициент комплексного использования сырья в этой области составляет 62,7...73,6 %. Образующийся сплав, содержащий 29,7...32 % Si, в соответствии с [34], можно отнести к ферросилицию марки FeSi25. Нестандартный карбид кальция с литражом 200...230 dm^3/kg можно использовать в сельском хозяйстве [35–39]. Так, в соответствии с [35, 39], применение такого карбида кальция (60...120 кг/гектар) на подзолистых суглинистых почвах повышает урожайность огурцов на 30...50 % (иногда может достигать до 94 %).



L – (—), dm^3/kg (dm^3/kg),
 $\alpha_{Ca(CaC_2)}$, % – (---),
 $\alpha_{Si_{(спл)}}/\alpha_{Si_{(аллоу)}}$, % – (.....)

Рис. 7. Совмещенная информация по влиянию температуры и количества железа на поведение кремния, кальция и литраж карбида

Fig. 7. Combined information about effect of temperature and iron amount on the behavior of silicon, calcium capacity and carbide

Таблица 3. Значения технологических параметров в области **abcd** рис. 7

Table 3. Technological parameters at the boundary of the **abcd** region of Fig. 7

Точки на рис. 7 Point in Fig. 7	T, °C	Fe	$\alpha_{Si_{(спл)}}/\alpha_{Si_{(аллоу)}}$	$\alpha_{Ca(CaC_2)}$	$CSi_{(спл)}/CSi_{(аллоу)}$	γ	L, $dm^3/kg/dm^3/kg$
			%				
a	2037,5	22,7	55,0	39,2	30,1	73,6	200,3
b	2058,0	27,01	61,9	35,1	29,7	62,7	200,0
c	2088,0	20,0	56,2	35,0	32,5	72,8	236,5
d	2077,4	20,0	55,0	36,7	32,0	72,9	232,0
f	2085,0	21,4	57,7	35,0	32,0	73,1	230,1

Необходимо отметить, что традиционный промышленный метод электротермической переработки фосфоритов при среднем показателе извлечения 90 % фосфора в газ, 4,5 % – в феррофосфор, 80 % железа – в феррофосфор, ≈1 % кремния – в феррофосфор и полный переход кальция в шлак, показатель комплексного использования сырья по уравнению (6) составляет:

$$\gamma = \frac{(90+4,5)P+80(Fe)+1(Si)+0(Ca)}{4} * 100 = 43,9 \% . (6)$$

Следовательно предлагаемый нами метод переработки фосфоритов, по термодинамическим прогнозам, позволяет увеличить γ от 43,9 до 62,7...73,6 %, то есть в 1,43...1,67 раза.

Необходимо отметить, что представленные результаты получены в равновесных условиях, без учета технологических особенностей процесса электроплавки, в частности внутреннего строения печного пространства (вертикального и горизонтального), градиентов температуры. Используя результаты известных работ в области электротермического получения фосфора, карбида кальция, кремнистых ферросплавов [40–42], можно лишь предположить, что преимущественное образование карбида кальция происходит в подэлектродной области при температуре 1800...2000 °С, ферросплав начинает формироваться на периферии реакционного тигля при 1600...1800 °С и фосфор из трикальцийфосфата восстанавливается и возгоняется в верхних горизонтах ванны при 1400...1600 °С. Однако для подтверждения этой гипотезы необходимо в будущем проведение специальной серии исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Эвенчик С.Д., Бродский А.А. Технология фосфорных и комплексных удобрений. – М.: Химия, 1987. – 464 с.
2. Raiymbekov Y., Abdurazova P., Nazarbek U. Enrichment of low-grade phosphorites by the selective leaching method // *Green Processing and Synthesis*. – 2023. – Vol. 12 (1). – P. 20228150. URL: <https://doi.org/10.1515/gps-2022-8150> (дата обращения 10.04.2023).
3. Usmanov Kh., Chernyakova R., Dzhusipbekov U. Influence of modifying additives on the properties of dispersed phosphorites // *Perspectives of Innovations, Economics & Business*. – 2010. – Vol. 6. – № 3. – P. 131–133.
4. Abildayeva A., Turgumbayeva K., Blumberga D. Systematization of material flows of natural and secondary raw materials of phosphorus industry of the Republic of Kazakhstan // *Environmental and Climate Technologies*. – 2021. – Vol. 25 (1). – P. 894–906 URL: <https://doi.org/10.2478/rtuect-2021-0067> (дата обращения 10.04.2023).
5. Finding of new opportunities for target use of phosphate ores' deposits of Kazakhstan / A. Kydyraliyeva, U. Besterekov, K. Nurashveva, K. Urakov, A. Bolysbek, U. Nazarbek // *International Journal of Engineering Research and Technology*. – 2019. – Vol. 12 (12). – P. 2516–2524.
6. Постников Н.Н. Термическая фосфорная кислота. Химия и технология. – М.: Химия, 1970. – 304 с.
7. Mechanical activation of the phosphorites (Karatau Pool) by using organic-mineral co-activators for multicomponent mineral fertilizers / K. Zhantasov, S. Moldabekov, M. Zhantasov, K. Baibolov, M. Nalibayev, D. Zhantasova, K. Bazhirova, Z. Altybayev, T. Kadynceva, O. Dormeshkin, A. Minakovskiy, V. Shatilo, G. Pinayev // *Eurasian Chemico-Technological Journal*. – 2015. – № 17 (4). – P. 317–326. DOI: <https://doi.org/10.18321/ectj276>
8. Optimization of decomposition process of Karatau phosphorites / B. Myrzakhmetova, U. Besterekov, I. Petropavlovskiy, S. Ahnazarova, V. Kiselev, S. Romanova // *Eurasian Chemico-Technological Journal*. – 2012. – № 14 (2). – P. 183–190. URL: <https://doi.org/10.18321/ectj113> (дата обращения 10.04.2023).
9. Production of compound fertilizers on the basis of phosphorus component obtained by partial acidulation of low-grade phosphate rocks / J. Hoffmann, M. Rolewicz, J. Skut, S. Schab // *Przemysl Chemiczny*. – 2014. – Vol. 93 (6). – P. 924–927
10. Проведение агрохимических испытаний удобрения из фосфоритной муки / Г.Б. Жаумитова, Т.Б. Байдинов, И.Н. Нурлыбаев, А.А. Агишева, З.Б. Султамуратова // *Новый университет. Серия: Технические науки*. – 2016. – № 10–11. – С. 28–31.

Заключение

На основании полученных результатов по взаимодействию смеси фосфоритов месторождений Каратау и Актобе с углеродом и железом можно сделать следующие выводы:

- продуктами взаимодействия в зависимости от температуры являются: CaSiO_3 , SiO_2 , Si , SiC , $\text{SiO}_{(g)}$, MgSiO_3 , Al_2SiO_5 , $\text{Na}_2\text{SiO}_3\text{Ca}_{(g)}$, CaO , CaC_2 , CaF_2 , CaS , Fe , FeSi , FeSiO_3 , FeP , Fe_2P , Fe_3P , FeP_2 , FeO , Fe_3Si ; $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, $\text{P}_{2(g)}$, $\text{P}_{4(g)}$;
- увеличение количества железа повышает степень извлечения кремния в сплав, уменьшает при 2000 °С извлечение кальция в CaC_2 и концентрацию кремния в сплаве;
- для получения из смеси фосфоритов марочного карбида кальция литражом более 230 $\text{дм}^3/\text{кг}$, ферросилиция марки FeSi25 , полной отгонки фосфора в газовую фазу процесс необходимо проводить при 2077...2088 °С в присутствии 20...21,4 % железа и 43 % углерода;
- предлагаемый нами метод термической переработки фосфоритов, исходя из результатов термодинамического компьютерного моделирования, позволит повысить показатель комплексного использования сырья от 43,9 до 62,7...73,6 %, то есть в 1,43...1,67 раз;
- предлагаемая технология способствует увеличению активных запасов фосфоритов и дает возможность использовать в производстве низкосортные фосфориты Актобинских месторождений.

11. Dzhanmuldaeva Zh., Dzhanmuldaeva A., Ermetova K. Possibility of producing nitrophosphates from low-grade phosphate raw material // *The Strategies of Modern Science Development: Proceedings of the XIX International scientific-practical conference*. Morrisville, USA, October 07–08, 2020. – Morrisville, USA: Lulu Press, 2020. – P. 9–13.
12. Электротермические процессы и реакторы / С.П. Богданов, К.Б. Козлов, Б.А. Лавров, Э.Я. Соловейчик. – СПб: Проспект науки, 2009. – 423 с.
13. Горбенко А.Н. Разработка исследование процесса получения фосфора из производственных отходов фосфатно-кремнистой и коксовой щелочи методом индукционного нагрева без предварительного окомкования: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Ташкент, 1979. – 21 с.
14. Калмыков С.И., Капишев Т.А., Бектуров А.Б. Метод получения фосфора восстановлением фосфоритов смесью углеводородов и угля // *Физико-химические исследования фосфат-, силикат-, ртутьсодержащих систем*. – Алма-Ата.: Наука КазССР, 1985. – С. 189–264.
15. Донцов А.Я. Энерготехнологическое комбинирование в технологических процессах химической электротермии // *Журнал ВХО им. Д.И. Менделеева*. – 1979. – Т. XXIV. – С. 587–593.
16. Новая экологически безопасная технология производства фосфора из бедного фосфатного сырья / А.Б. Усачев, А.В. Баласанов, В.Е. Лехерзак, Д.В. Ключев // *Экология и безопасность в техносфере: Материалы научно-технической конференции*. – Орел: ФГОУ ВПО «Гос. университет –УНПК», 2011. – С. 167–169.
17. Сравнительная оценка различных методов производства желтого фосфора. Исследования в области химической электротермии / В.А. Смирнов, Ш.И. Риф, Ю.Н. Вильк, К.В. Харджель // *Труды института ЛенНИИГИПРОХИМ*. – 1972. – № 6. – С. 99–106.
18. Якушевич Н.Ф. Состояние фосфорной промышленности и перспектива ее развития // *Металлургия: технологии, управление, инновации, качество: Сб. трудов Всероссийской научно-практической конференции*. – Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2011. – С. 52–54
19. Способ переработки фосфорита: пат. Республика Казахстан № 35033; заявл. 09.09.19; опубл. 30.04.21, Бюл. № 17. – 5 с.
20. Термодинамическое и экспериментальное исследование влияния температуры и давления на получение кремнистого сплава, карбида кальция и газообразного фосфора из фосфоритов Чилисай / В.М. Шевко, А.Д. Бадикова, М.А. Тулеев, Г.Е. Каратаева, Р.А. Утеева // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. – 2022. – № 12. – С. 92–97.
21. Shevko V.M., Badikova A.D., Uteeva R.A. Interaction of tricalcium phosphate with products of carbothermic reduction of silicon oxide // *Metalurgija*. – 2023. – № 62 (3–4). – P. 447–450.
22. Tangstad M. *Handbook of Ferroalloys. Ch. 6. Ferrosilicon and Silicon Technology*. – London: Butterworth-Heinemann, 2013. – 73 p.
23. Gasik M. *Handbook of ferroalloys. Theory and technology*. – London: Butterworth-Heinemann, 2013. – 536 p.
24. Machulec B., Gil S., Bialik W. Equilibrium model of the ferrosilicon process in the submerged ARC furnace // *Conference Proceedings: METAL 2018 – 27th International Conference on Metallurgy and Materials*. – Brno, Czech Republic, 2018. – P. 122–127.
25. New approach in research of quartzes and quartzites for ferroalloys and silicon production / J. Legemza, R. Findorak, B. Bulko, J. Briancin // *Metals*. – 2021. – Vшд. 11 (4). – № 670 URL: <https://doi.org/10.3390/met11040670> (дата обращения 10.04.2023).
26. Roine A. HSC Chemistry, Metso: Outotec, Pori, 2021. URL: www.mogroup.com/hsc (дата обращения: 30.01.2023).
27. Akylbekov Y., Shevko V., Karatayeva G. Thermodynamic prediction of the possibility of comprehensive processing chrysotile-asbestos waste // *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*. – 2023. – № 8. – art. no. 100488. URL: <https://doi.org/10.1016/j.csee.2023.100488> (дата обращения 10.04.2023).
28. Расчет равновесного распределения элементов применительно к программному комплексу HSC-5.1. Программа для ЭВМ: свидетельство на объект, охраняемый авторским правом РК № 1501; опубл. 29.01.2019.
29. Гринфельд Г.М., Моисеев А.В. Методы оптимизации эксперимента в химической технологии. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО КНАГТУ, 2014. – 75 с.
30. Processing of phosphorites with extraction of phosphorus, obtaining calcium carbide and ferroalloy / V. Shevko, R. Uteyeva, A. Badikova, S.T. Tleuova // *Physicochemical Problems of Mineral Processing*. – 2023. – № 59 (6). – 174463. URL: <https://10.37190/ppmp/174463> (дата обращения 10.04.2023).
31. Shevko V., Aitkulov D., Badikova A. Comprehensive processing of vanadium-containing black shale tailings // *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*. – 2022. – № 66 (4). – P. 617–628. URL: <https://doi.org/10.3311/PPch.20050> (дата обращения 10.04.2023).
32. Козлов К.Б., Лавров Б.А. Получение карбида кальция в дуговой печи и его анализ. – СПб.: СПбГИ(ТУ), 2011. – 24 с.
33. Очков В.Ф. *Mathcad 14 для студентов, инженеров и конструкторов*. – СПб.: БХВ-Петербург, 2007. – 368 с.
34. ГОСТ 1415-93. Ферросилиций. Технические требования и условия поставки. – М.: Стандартинформ, 2005. – 11 с.
35. Макаренко Л.Н. Применение под огурцы карбида кальция. URL: <http://www.cnsnb.ru/vniitei/bases/ics/tr/95075530.htm?ysclid=lb3hcm714o212572395> (дата обращения: 30.11.2022).
36. Role of encapsulated calcium carbide in nitrogen economy, growth and yield of crops: a review / R. Mahmood, A. Ali, M. Yaseen, M. Ahmad // *Journal of Animal and Plant Sciences*. – 2014. – Vol. 24 (2). – P. 354–361.
37. Siddiq S., Yaseen M., Mahmood R. Impact of calcium carbide induced nitrogen uptake and ethylene related response on fruit quality of three tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) cultivars // *Philippine Agricultural Scientist*. – 2015. – Vol. 98 (4). – P. 368–373.
38. Rodygin K.S., Vikenteva Y.A., Ananikov V.P. Calcium-based sustainable chemical technologies for total carbon recycling // *ChemSusChem*. – 2019. – Vol. 12 (8). – P. 1483–1516. URL: <https://doi.org/10.1002/cssc.201802412> (дата обращения 10.04.2023).
39. Calcium carbide-induced changes in germination, morpho-phenological and yield traits in cucumber (*cucumis sativus*) / M. Shakar, M. Yaseen, A. Niaz, R. Mahmood, M.M. Iqbal, T. Naz // *International Journal of Agriculture and Biology*. – 2016. – № 18 (4). – P. 703–709. URL: <https://doi.org/10.17957/IJAB/15.0154> (дата обращения 10.04.2023).
40. Микулинский А.С. Процессы рудной электротермии. – М.: Металлургия, 1966. – 280 с.
41. Струнский Б.М. Руднотермические плавильные печи. – М.: Металлургия, 1972. – 357 с.
42. Сисоян Г. А. Электрическая дуга в электрической печи. – М.: Металлургия, 1974. – 304 с.

Информация об авторах

Виктор Михайлович Шевко, доктор технических наук, профессор кафедры технологий силикатов и металлургии, Южно-Казахстанский университет им. М. Ауэзова, Казахстан, 160002, г. Шымкент, пр. Тауке хана, 5. shevkovm@mail.ru; <http://orcid.org/0000-0002-9814-6248>

Александра Дмитриевна Бадикова, младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории Перспективные металлургические технологии, Южно-Казахстанский университет им. М. Ауэзова, Казахстан, 160002, г. Шымкент, пр. Тауке хана, 5. sunstroke_91@mail.ru; <http://orcid.org/0000-0003-0027-4258>

Раиса Акылбековна Утеева, докторант кафедры технологии неорганических и нефтехимических производств, Южно-Казахстанский университет им. М. Ауэзова, Казахстан, 160002, г. Шымкент, пр. Тауке хана, 5. raisa.uteeva.76@mail.ru; <http://orcid.org/0000-0003-3460-4198>

Борис Александрович Лавров, доктор технических наук, профессор кафедры общей химической технологии и катализа, Санкт-Петербургский государственный технологический институт, Россия, 190013, г. Санкт-Петербург, пр. Московский, 26. ba_lavrov@mail.ru; <http://orcid.org/0000-0002-7235-2107>

Даниэль Даниарович Аманов, младший научный сотрудник кафедры технологий силикатов и металлургии, Южно-Казахстанский университет им. М. Ауэзова, Казахстан, 160002, г. Шымкент, пр. Тауке хана, 5. danielamanov5@gmail.com; <http://orcid.org/0000-0002-7379-1910>

Поступила в редакцию: 14.04.2023

Поступила после рецензирования: 14.11.2023

Принята к публикации: 10.01.2024

REFERENCES

1. Evenchik S.D., Brodskiy A.A. *Technology of phosphate and complex fertilizers*. Moscow, Khimiya Publ., 1987. 464 p. (In Russ.)
2. Raiymbekov Y., Abdurazova P., Nazarbek U. Enrichment of low-grade phosphorites by the selective leaching method. *Green Processing and Synthesis*, 2023, vol. 12, no. 1, 20228150. Available at: <https://doi.org/10.1515/gps-2022-8150> (accessed 10 April 2023).
3. Usmanov Kh., Chernyakova R., Dzhusipbekov U. Influence of modifying additives on the properties of dispersed phosphorites. *Perspectives of Innovations, Economics & Business*, 2010, vol. 6, no. 3, pp. 131–133.
4. Abildayeva A., Turgumbayeva K., Blumberga D. Systematization of material flows of natural and secondary raw materials of phosphorus industry of the Republic of Kazakhstan. *Environmental and Climate Technologies*, 2021, vol. 25 (1), pp. 894–906. Available at: <https://doi.org/10.2478/rtuect-2021-0067> (accessed 10 April 2023).
5. Kydyraliyeva A., Besterekov U., Nurashva K., Urakov K., Bolysbek A., Nazarbek U. Finding of new opportunities for target use of phosphate ores' deposits of Kazakhstan. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 2019, vol. 12 (12), pp. 2516–2524.
6. Postnikov N.N. *Thermal phosphoric acid. Chemistry and technology*. Moscow, Khimiya Publ., 1970. 304 p. (In Russ.)
7. Zhantasov K., Moldabekov S., Zhantasov M., Baibolov K., Nalibayev M., Zhantasova D., Bazhirova K., Altybayev Z., Kadynceva T., Dormeshkin O., Minakovskiy A., Shatilo V., Pinayev G. Mechanical activation of the phosphorites (Karatau Pool) by using organic-mineral co-activators for multicomponent mineral fertilizers. *Eurasian Chemico-Technological Journal*, 2015, no. 17 (4), pp. 317–326. DOI: <https://doi.org/10.18321/ectj276>.
8. Myrzakhmetova B., Besterekov U., Petropavlovskiy I., Ahnazarova S., Kiselev V., Romanova S. Optimization of decomposition process of Karatau phosphorites. *Eurasian Chemico-Technological Journal*, 2012, no. 14 (2), pp. 183–190. Available at: <https://doi.org/10.18321/ectj113> (accessed 10 April 2023).
9. Hoffmann J., Rolewicz M., Skut J., Schab S. Production of compound fertilizers on the basis of phosphorus component obtained by partial acidulation of low-grade phosphate rocks. *Przemysl Chemiczny*, 2014, vol. 93 (6), pp. 924–927.
10. Zhaumitova G.B., Baydinov T.B., Nurlybayev I.N., Agisheva A.A., Sultamuratova Z.B. Carrying out agrochemical tests of products from phosphate rock. *Novy universitet. Seriya: Tekhnicheskiye nauki*, 2016, no. 10–11, pp. 28–31. (In Russ.)
11. Dzhanmuldaeva Zh., Dzhanmuldaeva A., Ermetova K. Possibility of producing nitrophosphates from low-grade phosphate raw material. *The Strategies of Modern Science Development: Proc. of the XIX International scientific-practical conference*. Morrisville, USA Publ., 2020. pp. 9–13.
12. Bogdanov S.P., Kozlov K.B., Lavrov B.A., Soloveychik E.Ya. *Electrothermal processes and reactors*. St. Petersburg, Prospekt nauki Publ., 2009. 423 p. (In Russ.)
13. Gorbenko A.N. *Development of a study of the process of obtaining phosphorus from industrial wastes of phosphate-siliceous and coke alkali by the method of induction heating without preliminary pelletizing*. Cand. Diss. Abstract. Tashkent, 1979. 21 p. (In Russ.)
14. Kalmykov S.I., Kapishev T.A., Bekturov A.B. *The method of obtaining phosphorus by the reduction of phosphorites with a mixture of hydrocarbons and coal. Physical and chemical studies of phosphate-, silicate-, mercury-containing systems*. Alma-Ata, Nauka KazSSSR Publ., 1985. pp. 189–264. (In Russ.)
15. Dontsov A.Ya. Energy-technological combination in technological processes of chemical electrothermia. *Zhurnal VKHO im. D.I. Mendeleeva*, 1979, vol. XXIV, pp. 587–593. (In Russ.)
16. Usachev A.B., Balasanov A.V., Lekherzak V.E., Klyuyev D.V. New environmentally safe technology for the production of phosphorus from poor phosphate raw materials. *Ecology and safety in the technosphere. Proc. of the scientific and technical conference*. Orel, UNPK Publ., 2011. pp. 167–169. (In Russ.)
17. Smirnov V.A., Rif Sh.I., Vilks Yu.N., Khardkel K.V. Comparative evaluation of various methods for the production of yellow phosphorus. Research in the field of chemical electrothermy. *Trudy instituta LenNIIGIPROKHIM*, 1972, no. 6, pp. 99–106. (In Russ.)

18. Yakushevich N.F. The state of the phosphorus industry and the prospect of its development. *Metallurgy: technology, management, innovation, quality. Proc. of the All-Russian Scientific and Practical Conference*. Novokuznetsk, SibGIU Publ., 2011. pp. 52–54. (In Russ.)
19. Shevko V.M., Uteeva R.A., Lavrov B.A. *Method for processing phosphorite*. Patent KZ, no. 35033, 2019. (In Russ.)
20. Shevko V.M., Badikova A.D., Tuleev M.A., Karatayeva G.E., Uteeva R.A. Thermodynamic and experimental study of the influence of temperature and pressure on the production of a silicon alloy, calcium carbide and gaseous phosphorus from Chilisai phosphorites. *International Journal of Applied and Fundamental Research*, 2022, no. 12, pp. 92–97. (In Russ.)
21. Shevko V.M., Badikova A.D., Uteeva R.A. Interaction of tricalcium phosphate with products of carbothermic reduction of silicon oxide. *Metallurgiya*, 2023, vol. 62 (3–4), pp. 447–450. (In Russ.)
22. Tangstad M. *Handbook of ferroalloys. Ch. 6. Ferrosilicon and Silicon Technology*. London, Butterworth-Heinemann, 2013. 73 p.
23. Gasik M. *Handbook of ferroalloys. Theory and Technology*. London, Butterworth-Heinemann, 2013. 536 p.
24. Machulec B., Gil S., Bialik W. Equilibrium model of the ferrosilicon process in the submerged ARC furnace. *Conference Proceedings: METAL 2018 – 27th International Conference on Metallurgy and Materials*. Brno, Czech Republic, 2018. pp. 122–127. (In Russ.)
25. Legemza J., Findorak R., Bulko B., Briancin J. New approach in research of quartzes and quartzites for ferroalloys and silicon production. *Metals*, 2021, vol. 11 (4), no. 670. Available at: <https://doi.org/10.3390/met11040670> (accessed: 10 April 2023).
26. Roine A. *HSC Chemistry*, Metso, Outotec, Pori, 2021. Available at: www.mogroup.com/hsc (accessed: 30 January 2023).
27. Akylbekov Y., Shevko V., Karatayeva G. Thermodynamic prediction of the possibility of comprehensive processing chrysotile-asbestos waste. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 2023, vol. 8, art. no. 100488 Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100488> (accessed: 10 April 2023).
28. Shevko V.M., Serzhanov G.M., Karatayeva G.Ye., Amanov D.D. *Calculation of the equilibrium distribution of elements in relation to the software package HSC-5.1. Computer program*. Certificate for an object protected by copyright KZ, no. 1501, 2019. (In Russ.)
29. Grinfeld G.M., Moiseev A.V. *Methods for optimizing an experiment in chemical technology*. Komsomolsk-na-Amure, KnAGTU Publ., 2014. 75 p. (In Russ.)
30. Shevko V., Uteyeva R., Badikova A., Tleuova S.T. Processing of phosphorites with extraction of phosphorus, obtaining calcium carbide and ferroalloy. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 2023, no. 59 (6), 174463. Available at: <https://10.37190/ppmp/174463> (accessed: 10 April 2023).
31. Shevko V., Aitkulov D., Badikova A. Comprehensive processing of vanadium-containing black shale tailings. *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*, 2022, no. 66 (4), pp. 617–628. Available at: <https://doi.org/10.3311/PPch.20050> (accessed: 10 April 2023).
32. Kozlov K.B., Lavrov B.A. *Obtaining calcium carbide in an arc furnace and its analysis*. St. Petersburg, St. Petersburg State Institute of Technology Publ., 2011. 24 p. (In Russ.)
33. Ochkov V.F. *Mathcad 14 for students, engineers and designers*. St. Petersburg, BKHV-Peterburg Publ., 2007. 368p. (In Russ.)
34. *SS 1415-93. Ferrosilicon. Technical requirements and terms of delivery*. Moscow, Standartinform Publ., 2005. 11 p. (In Russ.)
35. Makarenko L.N. *Application under cucumbers of calcium carbide*. (In Russ.) Available at: <http://www.cnsbh.ru/vniitei/bases/ics/r/95075530.htm?ysclid=lb3hcm714o212572395> (accessed: 30 November 2022).
36. Mahmood R., Ali A., Yaseen M., Ahmad M. Role of encapsulated calcium carbide in nitrogen economy, growth and yield of crops: a review. *Journal of Animal and Plant Sciences*, 2014, no. 24 (2), pp. 354–361.
37. Siddiq S., Yaseen M., Mahmood R. Impact of calcium carbide induced nitrogen uptake and ethylene related response on fruit quality of three tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) cultivars. *Philippine Agricultural Scientist*, 2015, no. 98 (4), pp. 368–373.
38. Rodygin K.S., Vikenteva Y.A., Ananikov V.P. Calcium-based sustainable chemical technologies for total carbon recycling. *ChemSusChem*, 2019, no. 12 (8), pp. 1483–1516. Available at: <https://doi.org/10.1002/cssc.201802412> (accessed: 10 April 2023).
39. Shakar M., Yaseen M., Niaz A., Mahmood R., Iqbal M.M., Naz T. Calcium carbide-induced changes in germination, morpho-phenological and yield traits in cucumber (*cucumis sativus*). *International Journal of Agriculture and Biology*, 2016, no. 18 (4), pp. 703–709. Available at: <https://doi.org/10.17957/IJAB/15.0154> (accessed: 10 April 2023).
40. Mikulinsky A.S. *Processes of ore electrothermy*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1966. 280 p. (In Russ.)
41. Strunsky B.M. *Ore-smelting furnaces*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1972. 357 p. (In Russ.)
42. Sisoyan G. A. *Electric arc in an electric furnace*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1974. 304 p. (In Russ.)

Information about the authors

Viktor M. Shevko, Dr. Sc., Professor, M. Auezov South Kazakhstan University, 5, Tauke Khan avenue, Shymkent, 160012, Kazakhstan. shevkovm@mail.ru; <http://orcid.org/0000-0002-9814-6248>

Alexandra D. Badikova, Senior Resaercher, M. Auezov South Kazakhstan University, 5, Tauke Khan avenue, Shymkent, 160012, Kazakhstan. sunstroke_91@mail.ru; <http://orcid.org/0000-0003-0027-4258>

Raisa A. Uteyeva, Doctoral Cand., Saint M. Auezov South Kazakhstan University, 5, Tauke Khan avenue, Shymkent, 160012, Kazakhstan. raisa.uteeva.76@mail.ru; <http://orcid.org/0000-0003-3460-4198>

Boris A. Lavrov, Dr. Sc., Professor, Petersburg State Institute of Technology, 26, Moskovsky avenue, Saint Petersburg, 190013, Russian Federation. ba_lavrov@mail.ru; <http://orcid.org/0000-0002-7235-2107>

Daniel D. Amanov, Senior Resaercher, M. Auezov South Kazakhstan University, 5, Tauke Khan avenue, Shymkent, 160012, Kazakhstan. danielamanov5@gmail.com; <http://orcid.org/0000-0002-7379-1910>

Received: 14.04.2023

Revised: 14.11.2023

Accepted: 10.01.2024