ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 669.15-198

## ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ВЫПЛАВКИ ИЗ БАЗАЛЬТА ДУБЕРСАЙ ФЕРРОСПЛАВА И КАРБИДА КАЛЬЦИЯ

Шевко В.М., Бадикова А.Д., Каратаева Г.Е., Тулеев М.А., Аманов Д.Д., Утеева Р.А.

Южно-Казахстанский государственный университет им. М. Ауэзова, Шымкент, e-mail: shevkovm@mail.ru

Исследования проводились методами термодинамического прогнозирования и электроплавкой в дуговой печи. Термодинамическое моделирование проводилось с использованием программного комплекса HSC-5.1, основанного на принципе минимума энергии Гиббса. Электроплавку шихты проводили в одноэлектродной футерованной дуговой печи. Определение оптимальных параметров находилось методом планирования экспериментов с использованием рототабельного плана второго порядка с последующим нахождением оптимума графическим методом. Анализ сырья и продуктов плавки проводился с использованием растрового электронного микроскопа атомно-адсорбционного (прибор AAS-1 (Германия)), а также методом пикнометрии. На основании полученных результатов по переработке базальта месторождения Дуберсай найдено, что в равновесных условиях для получения из базальта карбида кальция литражом 250–300 дм<sup>3</sup>/кг, ферросплава, содержащего 57,4–63,3% Si + Al (со степенью перехода кальция литражом 250–300 дм<sup>3</sup>/кг, при электроплавке рядового базальта для получения карбида кальция литражом 233–305 дм<sup>3</sup>/кг и ферро сплав с содержанием 50–53% Si + Al (при извлечении кальция в карбид кальция 50–53% м кремния в ферросплава 72,5–73,6%) процесс необходимо проводить в карбид кальция литражом 233–305 дм<sup>3</sup>/кг и ферро сплав 72,5–73,6%) процесс необходимо проводить в карбид кальция литражом 233–305 дм<sup>3</sup>/кг и ферросплава та с содержанием 50–53% Si + Al (при извлечении кальция в карбид кальция 0–2% стальной стружки.

Ключевые слова: базальт, углетермическое восстановление, термодинамическое моделирование, электроплавка, карбид кальция, ферросплав

### THEORETICAL SUBSTANTIATION AND TECHNOLOGY OF SMELTING FERROALLOY AND CALCIUM CARBIDE FROM BASALT DUBERSAY

Shevko V.M., Badikova A.D., Karataeva G.E., Tuleev M.A., Amanov D.D., Uteeva R.A.

M. Auezov South Kazakhstan State University, Shymkent, e-mail: shevkovm@mail.ru

The researches were carried out by thermodynamic forecasting methods and electric melting in an arc furnace. Thermodynamic modeling was carried out using the software package HSC-5.1 based on the principle of minimum Gibbs energy. Electric melting of the charge was carried out in a single-electrode lined arc furnace. The optimal parameters were determined by the method of planning experiments using the rotatable plan of the second order with the subsequent finding of the optimum by the graphical method. Analysis of raw materials and melting products was carried out using the scanning electron microscope atomic adsorption (device AAS-1 (Germany) and also by pycnometry. On the basis of the results obtained for the processing of basalt deposits Dubersay found to be in equilibrium to obtain basalt of calcium carbide with capacity of 250-300 dm3/kg of ferroalloy containing of 57.4-63.3 % of Si + AI (with a degree of transition of calcium in calcium carbide 70-73,5 %, silicon in the alloy of 92.3-96.1 % of) the process must be carried out at 1954-2008 °C in the presence of 4-8 % of iron. When the electrofusion of raw basalt for obtaining of calcium carbide and 68.6-75.3 per cent, and silicon in ferroalloy of 72.5-73.6 % of) the process should be carried out in the presence of 20.4-30 % lime, 0-2 % steel shavings.

Keywords: basalt, carbon thermal reduction, thermodynamic modeling, electric melting, calcium carbide, ferroalloy

Развитие металлургического производства во многом определяется наличием устойчивой сырьевой базы (сырьевого резерва), обеспечивающей работу предприятий в течение длительного периода времени (50 и более лет). Поэтому в сырье должны присутствовать элементы с высоким кларком. Для производства кремнистых ферросплавов (кларк Si составляет 29,5%) к такому (многомиллионному) сырью относится горная порода базальт, которая по Дели состоит из оксидов кремния (46.06%), алюминия (15,17%), кальция (8,95%), железа (11,75%). В Казахстане запасы базальта составляют около 75 млн т [1], в частности запасы базальта месторождения Дуберсай, расположенного в Актюбинской области составляют 10,8 млн т. Сейчас базальты используются для производства базальтового волокна [2, 3] (непрерывное микрон, 1 = 40 - 60 км; тонкого d = 6 - 21d = 6-12 микрон, 1 = 30-60 мм; супертонкого d = 1-3 микрон l = 50-60 мм), базальтовой ваты [4], строительных материалов, каменного литья [5], теплоизоляционной продукции, как сырье для производства портландцементного клинкера и других изделий [6]. Присутствие в базальте кроме SiO<sub>2</sub> также 35,87% сксидов алюминия, кальция и железа не позволяет комплексно его использовать при получении ферросплава ввиду образования большого количества шлака (≈40-50% от массы ферросплава). Поэтому необходимо создание такой технологии, которая предусматривает получить из базальта не только ферросплав,

МЕЖДУНАРОДНЫЙ ЖУРНАЛ ПРИКЛАДНЫХ И ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ № 10, 2019 но еще и другую продукцию. Совмещение одновременного получения в электропечи нескольких продуктов позволяет не только повысить степень комплексного использования сырья, но и уменьшить тепловые и электрические потери, на долю которых приходится от 11 до 14% энергии [7]. Исходя из состава базальта рациональным является совмещение в электропечи получения не только кремний-алюминийсодержащего ферросплава, но и кальциевой продукции, например карбида кальция. В работе приводятся результаты теоретических и прикладных исследований по переработке базальта месторождения Дуберсай.

Цель исследования: определение влияния температуры, количества углерода, железа и извести на электроплавку базальта Дуберсай с получением ферросплава и карбида кальция.

#### Материалы и методы исследования

Исследования проводили методом термодинамического моделирования и электроплавкой в дуговой печи.

Термодинамическое моделирование было выполнено с использованием программного комплекса HSC-5.1, основанного на принципе минимизации энергии Гиббса, разработанного Outokumpu Research Oy (Финляндия). При работе с комплексом HSC-5.1 первоначальная информация взаимодействия в системе представлялась в виде количественного распределения веществ. Затем, по алгоритму, разработанному авторами [8], определялась равновесная степень распределения элемента ( $\alpha$ ,%) по продуктам взаимодействия.

Электроплавку шихты проводили в одноэлектродной дуговой печи. Подовый электрод был выполнен из графитового блока. На подину устанавливали графитовый тигель (d = 6 см, h = 12 см). Печь в верхней части была закрыта съемной крышкой с отверстиями для графитового электрода (d = 3 см) и выхода газа. Перед проведением плавки проводили разогрев тигля дугой в течение 20–25 мин. После этого в тигель загружали первую порцию шихты (200–250 г). Проплавляли ее в течение 5–6 мин, затем загружали оставшуюся часть шихты (250–300 г) и проплавляли ее в течение необходимого времени. Электроэнергия в печь подавалась от трансформатора ТДЖФ-1002. После электроплавки горячий тигель извлекали из печи и охлаждали в течение 5-6 ч. Затем тигель разбивали. Карбид и ферросплав взвешивали и анализировали на Fe, Si, Ca и Al. Анализ сырья и продуктов электроплавки проводился методом растровой электронной микроскопии (прибор JSM-6490LM (Япония)), атомно-адсорбционным методом (прибор AAS-1N, (Германия)). Концентрация Si + Al в сплаве определялась также пикнометрическим методом по уравнениям, опубликованными нами в [9]. Степень извлечения кремния и алюминия в сплав определялась отношением массы металла в сплаве к массе металла в шихте. Степень извлечения кальция в технический карбид кальция (аса, %) определялась отношением массы Са в карбиде к массе Са в шихте. Концентрация СаС2 в техническом карбиде кальция, доли 1, определялась из выражения: С<sub>сас.</sub> = L / 372·100, в котором L литраж карбида кальция, дм<sup>3</sup>/кг (определяется экспериментально по методике [10]), 372 количество ацетилена (дм<sup>3</sup>) выделяющегося при взаимодействии 1 кг СаС, с водой.

Базальт использовали двух разновидностей: рядовой (по CaO) с содержанием 8–9,5% CaO и богатый с содержанием 15–18% CaO. По данным РЭМ (рис. 1) рядовой базальт, содержал, %: Si 18,08; Al 6,72; Ca 6,54; Mg 3,94; Fe 15,93; Na 2,06; K 0,27; Ti 1,09; Mn 0,31; P 0,15 и O<sub>2</sub> 44,9. По данным химического анализа богатый базальт содержал, %: SiO<sub>2</sub> 43,85; CaO 17,71; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 15,1; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 10,71; MgO 5,1; Na<sub>2</sub>O 2,75; K<sub>2</sub>O 2,57; TiO<sub>2</sub> 1,06; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 0,47. Кокс содержал 87,8% углерода, известь – 97,6% CaO и стальная стружка – 98,1% Fe.

# Результаты исследования и их обсуждение

Комплексом HSC-5.1 найдено, что в системах богатый базальт – Fe – nC присутствуют следующие вещества: CaSiO<sub>3</sub>, CaC<sub>2</sub>, Ca<sub>(g)</sub>, CaSi, Ca3<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, CaSi<sub>2</sub>, CaO, FeO, Fe, FeSi, Fe<sub>3</sub>Si, FeSi<sub>2</sub>, Fe<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>, Si, Si<sub>1</sub><sup>(g)</sup>, SiC, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub>, Al, Al<sub>4</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, Mg, Mg<sub>(g)</sub>, Na<sub>5</sub>SiO<sub>5</sub>, Na, Na<sub>(g)</sub>, K, K<sub>(g)</sub>, K, SiO<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O, TiO<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, C, P<sub>2(g)</sub>, P<sub>4(g)</sub>. Изменение количества углерода от 40 до 60% от массы базальта приводит к развитию карбидообразования кремния, кальция и кремния. При этом уменьшается образование FeSi, Fe3Si, CaSi, CaSi, и SiOr.



Ι

Элемент	Si	Ca	Al	Fe	Mg
Весовой, %	18,08	6,54	6,72	15,93	3,94
Элемент	Ti	Р	Mn	0	Na/K
Весовой, %	1,09	0,15	0,31	44,91	2,06/0,27

Π

Рис. 1. Энерго-дисперсионный спектр базальта Дуберсай, полученный на РЭМ

INTERNATIONAL JOURNAL OF APPLIED AND FUNDAMENTAL RESEARCH № 10, 2019



 $1 - \alpha_{\Sigma Si}, \%; 2 - \alpha_{Ca}(CaC_2), \%; 3 - \alpha_{Al}, \%$ 

Цифры на линии значения параметра поверхности отклика Рис. 2. Влияние температуры и количества углерода на  $a_{SSi}$ ,  $a_{Ca}(CaC_2)$ ,  $a_{Al}$ 



 $1 - C_{Si + Al}$ , %;  $2 - C_{Al}$ , %; 3 - L, дм<sup>3</sup>/кг Рис. 3. Влияние температуры и углерода на  $C_{Si + Al}$ ,  $C_{Al}$ , L

Используя метод рототабельного планирования исследований второго порядка нами получены следующие уравнения регрессий влияния температуры (T, °C) и количества углерода (У, %) на равновесное распределение кремния, кальция и алюминия [11]:

$$\alpha_{\Sigma Si} = -112, 1 + 0, 195 \cdot T + 0, 1175 \cdot Y - 4, 45 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 + 4, 18 \cdot 10^{-3} \cdot Y^2 - 2, 52 \cdot 10^{-4} T \cdot Y; (1)$$

$$\alpha_{Ca}(CaC_2) = -4796,86 + 4,6 \cdot T + 10,18 \cdot Y - -1.175 \cdot 10^{-3} \cdot T^2 - 0.1 \cdot Y^2 + 9.054 \cdot 10^{-4} \cdot T \cdot Y; (2)$$

$$\alpha_{AI} = -4738,71 + 4,35 \cdot \text{T} + 6,748 \cdot \text{Y} - -1,013 \cdot 10^{-3} \cdot \text{T}^2 - 4,33 \cdot 10^{-2} \cdot \text{Y}^2 - 7,05 \cdot 10^{-4} \cdot \text{T} \cdot \text{Y}. (3)$$

На основании уравнений (1-3) нами построены объёмные изображения поверхности откликов и их горизонтальные разрезы (рис. 2).

Из рис. 2 видно, что  $\alpha_{\Sigma Si}$  от 90,5 до 91% можно достичь в области abcdlf (т.е. при 1900–2170°C, 40–60% C). α<sub>Ca</sub>(CaC<sub>2</sub>) от 60 до 1900 21/10 С, 40 00 % С).  $\alpha_{ca}(CaC_2)$  01 00 до 62,4% наблюдается в области kmn (1955– 2010°С, 57–60% С). 90–93,85%  $\alpha_{A1}$  можно до-стичь при 2075–2180°С и 52,5–60% углерода.

Влияние температуры и количества углерода на  $C_{Si+Al}$ ,  $C_{Al}$ , L показано на рис. 3, из которого видно, что содержание  $\sum Si$ и Al в сплаве от 60 до 69,9%) наблюдается в температурной области 1900-2300°С при 51,5-60% углерода (заштрихована область на рис. 3 (В)). Из рис. 3 следует, что

МЕЖДУНАРОДНЫЙ ЖУРНАЛ ПРИКЛАДНЫХ И ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ № 10, 2019 высокую (15,0 17,85%) концентрацию алюминия в сплаве следует ожидать в температурной области 2000–2300 °С при 48,5–60% углерода. Высокий литраж карбида кальция (350–354 дм<sup>3</sup>/кг) возможен в температурной области 2020–2050 °С при 51,3–60% углерода (область abc на рис. 3).

На основании проведенных по плану исследований получены адекватные уравнения регрессии влияния температуры и количества железа [12], используя которые были построены зависимости  $\alpha_{Si}$ ,  $C_{Si}$ ,  $C_{Si+Al}$ , L = f(T, Fe)а затем получена совмещенная информация о технологических параметрах переработки базальта месторождения Дуберсай на ферросплав и карбида кальция (рис. 4).



(----) а<sub>са</sub>(CaC<sub>2</sub>),%; (-) L, дм<sup>3</sup>/кг



На область  $\alpha_{Ca}(CaC_2)$  от 70 до 73,5% наложены линии с литражом карбида кальция 250–300 дм<sup>3</sup>/кг. Таким образом была образована область abcdef. В табл. 1 приводятся граничные значения технологических параметров (T, Fe) обеспечи-

вающих  $\alpha_{Ca}(CaC_2) = 70-73,5\%$ , литраж 250–300 дм<sup>3</sup>/кг со значениями извлечения и концентрациями кремния и алюминия.

Электроплака базальта. Рядовой базальт (8-9,5% СаО) месторождения Дуберсай содержит CaO меньше, чем SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Поэтому литраж образующегося карбида кальция (из-за связывания СаО в силикаты и алюминаты кальция) не превышает 130-150 дм<sup>3</sup>/кг. Такой карбид кальция можно использовать в сельском хозяйстве [13]. Например, внесение 60–120 кг карбида на гектар позволяет увеличить урожайность огурцов на 30-50%. Для получения сортового карбида кальция нами исследовано влияние извести на показатели плавки базальта. На основании уравнений построены объемные поверхности откликов и их горизонтальные разрезы [14].

На рис. 5 приведена совмещенная информация о литраже и концентрации Si + Al в сплаве.



Рис. 5. Совмещенная информация о влиянии извести и стальной стружки на литраж карбида и концентрацию Si + Al в сплаве (----) C<sub>Si + AP</sub> %, (--) L, дм<sup>3</sup>/кг)

Таблица 1

Совмещенная информация о влиянии температуры и количества железа на технологические параметры получения ферросплава и карбида кальция из базальта месторождения Дуберсай

Точка на рис. 4	$\alpha_{Ca}(CaC_2),\%$	α <sub>Si cплав</sub> ,%	L, дм <sup>3</sup> /кг	C <sub>Si+Al</sub> %	C <sub>si</sub> ,%	C <sub>Al</sub> ,%	T, ℃	Fe,%
a	70,0	95,0	254	63,3	48,2	15,1	1968	4,0
b	70,0	93,6	250	60,7	46,7	14,0	1954	5,3
c	70,0	93,3	250	56,8	43,4	13,4	1974	7,6
d	70,0	93,6	300	56,2	42,6	13,6	1988	8,1
e	70,0	95,2	300	57,4	43,1	14,3	2008	7,4
f	72,0	96,1	300	63,5	47,7	15,8	1992	4,0
А	73,5	94,9	276	59,5	45,2	14,3	1980	6,0

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Технологические параметры на границе обл	ласти XAZF (по рис. 5)
--	------------------------

Точка на рисунке	Известь, %	Стальная стружка,%	α <sub>si</sub> ,%	α <sub>Al</sub> ,%	α <sub>ca</sub> ,%	C <sub>si</sub> ,%	C <sub>Al</sub> ,%	C <sub>Si+Al</sub> ,%	L, дм <sup>3</sup> /кг
X	20,42	0,00	73,4	69,3	73,2	41,6	11,7	53,2	233
А	21,70	2,00	73,6	71,7	68,6	38,9	11,0	50,0	233
A	22,63	1,85	73,4	71,2	69,2	38,9	11,0	50,0	240
A <sub>2</sub>	25,13	1,41	73,0	70,0	70,8	39,0	11,1	50,0	260
Z	30,00	0,64	72,6	68,9	73,8	39,0	11,2	50,0	301
F	30,00	0,00	72,5	68,9	75,3	39,7	11,4	51,0	305
X <sub>2</sub>	24,21	0,00	72,9	69,1	74,0	40,8	11,6	52,3	260
X <sub>1</sub>	21,43	0,00	73,2	69,2	73,4	41,4	11,7	53,0	240

Слева область XAZF ограничена литражом 233 дм<sup>3</sup>/кг, а сверху  $C_{Si+Al} \le 50$ %. В этой области (при 0–2,0% стальной стружки и 20,42–30% извести) литраж изменяется от 233 до 305 дм<sup>3</sup>/кг, а  $C_{Si+Al}$  от 50 до 53,3%. В области XAA<sub>1</sub>X<sub>1</sub> литраж карбида составляет 233–240 дм<sup>3</sup>/кг (карбид 3 сорта), в области X<sub>1</sub>A<sub>1</sub>A<sub>2</sub>A<sub>3</sub> 240–260 дм<sup>3</sup>/кг (карбид 2 сорта), в области X<sub>3</sub>A<sub>2</sub>ZF 260–305 дм<sup>3</sup>/кг (карбид 1 сорта). В табл. 2 приведена информация о αSi, αAl, αCa,  $C_{Si+Al}$ ,  $C_{Si}$ ,  $C_{Al}$  и L по границам области XAZF.

Йз табл. 2 следует, что в области XAZF в меньшей мере на количество извести и стальной стружки реагируют  $\alpha_{si}$  и  $\alpha_{Al}$  а более всего степень перехода кальция в карбид и его литраж. При получении карбида кальция литражом 233–240 дм<sup>3</sup>/кг  $\alpha_{si}$  составляет 73,2–73,6%,  $\alpha_{Al}$  69,2–71,7%,  $\alpha_{Ca}$  68,6–73,4%,  $C_{si+Al}$  50–53%. При образовании более качественного карбида литражом 260–305 дм<sup>3</sup>/кг  $\alpha_{si}$  составляет 72,5–73,0%,  $\alpha_{Al}$  68,9–70,0%,  $\alpha_{Ca}$  70,8–74,0%,  $C_{si+Al}$  50–52,3%.

### Заключение

На основании полученных результатов по пирометаллургической переработке базальта Дуберсай можно сделать следующие выводы.

– в равновесных условиях для получения из богатого по CaO базальта карбида кальция литражом 250–300 дм<sup>3</sup>/кг, ферросплава, содержащего 57,4–63,3% Si + Al (со степенью перехода кальция в карбид кальция 70–73,5%, кремния в сплав 92,3–96,1%) процесс необходимо проводить при 1954–2008 °C в присутствии 4–8% железа;

при электроплавке рядового базальта для получения карбида кальция литражом 233–305 дм<sup>3</sup>/кг и ферросплав с содержанием 50–53% Si + Al (при извлечении кальция в карбид 68,6–75,3% и кремния в ферросплава 72,5–73,6%) процесс необходимо проводить в присутствии 20,4–30% извести, 0–2% стальной стружки.

### Список литературы

1. Байбатша А.Б. Геология месторождений полезных ископаемых. Алматы: КазНТУ, 2008. 368 с.

Воробьев А.Е., Балтаева Г.А. Инновационные технологии получения изделий из базальта // Труды VI Междунар. научно-практ. конф. «Инженерные системы – 2013», посвящ. 100-летнему юбилею первого ректора РУДН профессора С.В. Румянцева. (Москва, 24–26 апреля 2013 г.). М.: РУДН, 2013. С. 266–270.

3. Оснос С.П., Ахмадиев В.Ф. Базальтовое непрерывное волокно // Патент РФ № 2381188. Патентообладатель общество с ограниченной ответственностью «Научно-производственное объединение «Вулкан». 2010. Бюл. № 4.

4. Gulamova D.D., Shevchenko V.P., Tokunov S.G., Kim R.B. Use of solar power for the production of basalt – based mineral fibers. Applied Solar Energy. 2012. № 48 (1). P. 58–59. DOI: 10.3103/S0003701X12010070.

5. Воробьев А.Е., Дребенштедт К., Чекушина Т.В. Чекушина Е.В. Базальт: инновационные технологии каменного литья. М.: РУДН, 2007. 198 с.

6. Drobot N.F., Noskova O.A., Steblevskii A.V., Fomichev S.V., Krenev K.A. Use of chemical and metallurgical methods for processing of gabbrobasalt raw material. Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2013. № 47 (4). P. 484–488. DOI: 10.1134/S0040579513040052.

7. Technological features of a furnace operation. In Lectures.com. 2019. [Electronic resource]. URL: http://lektsii. com/2-67960.html (ate of access: 28.08.201)

8. Udalov Ju.P. Application of program complexes of computing and geometrical thermodynamics at designing of technological processes of inorganic substances. St. Petersburg: St. Petersburg State Technological Institute, 2012. 183 p.

9. Amanov D.D., Shevko V.M., Karatayeva G.E., Serzhanov G.M. Thermodynamic analysis of obtaining ferroalloy from silicon-aluminum-containing silica clay. Chemistry & Chemical Technology. 2017. № 4. P. 411–414. DOI: 10.23939/chcht11.04.410.

10. Богданов С.П., Козлов К.Б., Лавров Б.А., Соловейчик Э.Я. Электротермические процессы и реакторы. СПб.: Проспект науки, 2009. 424 с.

11. Shevko V.M., Badikova A.D., Tuleev M.A., Karatayeva G.Y., Yeskendirova M.M. Thermodynamic model of calcium carbide and a ferroalloy production from the Dubersay deposit basalt. International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET). 2018. № 9. P. 1151–1160.

12. Шевко В.М., Каратаева Г.Е., Бадикова А.Д., Аманов Д.Д., Тулеев М.А. Термодинамическая модель влияния температуры и углерода на получение ферросплава и карбида кальция из базальта месторождения Дуберсай // Комплексное использование минерального сырья. 2018. № 3. С. 86–94.

 Макаренко Л.Н. Применение под огурцы карбида кальция // Известия ТСХА. 1996. № 3. С. 111–114.

14. Шевко В.М., Каратаева Г.Е., Лавров Б.А., Бадикова А.Д. Получение ферросплава и карбида кальция из базальта месторождения Дуберсай // Известия СПбГТИ(ТУ). 2019. № 49. С. 26–32.

Таблица 2