

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ КРЕМНИЯ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Тимофеев А.К.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВПО «Иркутский государственный технический университет», Иркутск, Россия (664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83), e-mail: [ak.timofeev@inbox.ru](mailto:ak.timofeev@inbox.ru)

Для получения базового материала – используется кремний металлургических марок, получаемый плавкой в рудно-термических печах (РТП). В связи с этим определены цель исследования, заключающаяся в исследовании путей повышения качества (химической чистоты) кремния, и методы ее достижения на данном этапе исследования – моделировании карботермического процесса получения кремния. В статье приведено описание основного механизма восстановления кремнезема в печи, представлена одна из конструкций печи и технологическая схема для производства кремния. Автором предложено изучить процесс получения чернового кремния в РТП с помощью программного комплекса «Селектор», была сформирована восьмirezервуарная модель выплавки кремния в РТП, которая адекватно описывает технологический процесс получения металлургического кремния.

Ключевые слова: рудно-термическая печь, термодинамическое моделирование, физико-химическая модель, кремний.

## OPTIMIZATION OF PRODUCING SILICON-BASED METHODS OF MATHEMATICAL MODELING

Timofeev A.K.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Irkutsk State Technical University, Irkutsk, Russia (664074, Irkutsk, street Lermontova, 83), e-mail: [ak.timofeev@inbox.ru](mailto:ak.timofeev@inbox.ru)

For reception of a base material - the silicon metallurgical marks received by fusion in electric arc furnaces is used. In this connection the definite purpose of research consisting in research ways improvement quality (chemical cleanliness) silicon, and methods its achievement at the given investigation phase - modeling carbonthermal process reception silicon. In article the description of the basic mechanism restoration silica in the furnace is resulted, one of designs the furnace and the technological scheme for silicon manufacture are presented. The author it is offered to study process of reception draught silicon in electric arc furnaces by means the "Selector" program complex, has been generated 8 reservoir model of melt silicon in electric arc furnaces which adequately describes technological process reception metallurgical silicon.

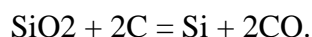
Keywords: ore-smelting furnace, modeling, physical-chemocal model, silicon.

### Введение

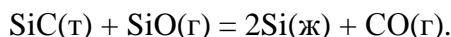
Кремний - один из самых популярных элементов XXI века, который находит широкое применение в различных отраслях промышленности. Например, кремний используется в качестве легирующей добавки в различных сплавах; для производства огнеупоров и абразивов; для производства кремнийорганических соединений; является основным материалом в электронике для транзисторов, выпрямителей тока (диодов), усилителей радиоволн (триодов), микропроцессоров (контроллеров) и интегральных схем для ЭВМ; используется в солнечной энергетике и микроэлектронике [1].

### Карботермическое восстановление кремнезёма в рудно-термических печах

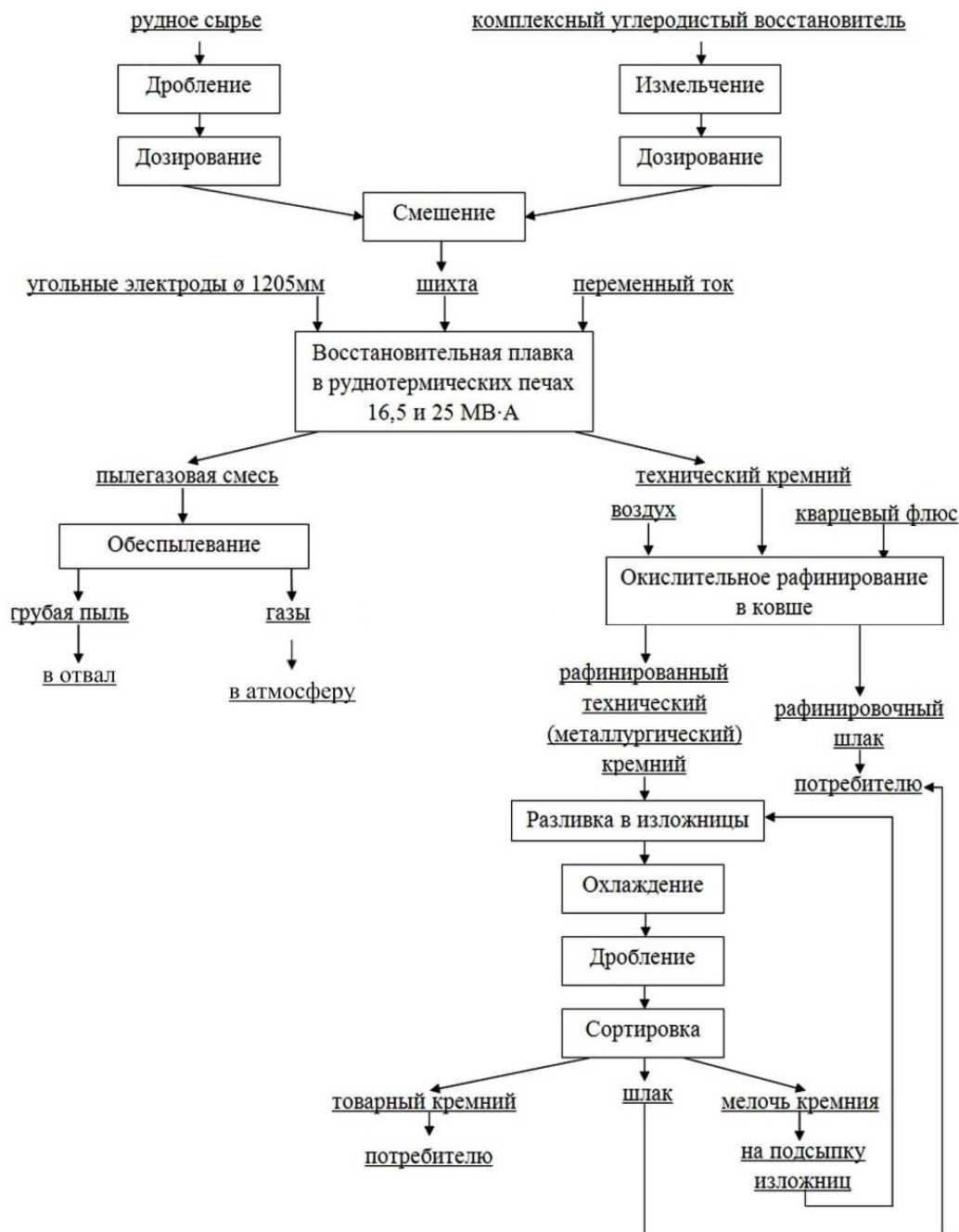
Процесс получения технического (металлургического) кремния ( $Si_{\text{тех}}$ ) методом карботермического восстановления кремнезёма углеродистым восстановителем (УВ) в рудно-термических печах (РТП) может быть описан общей реакцией:



Основной же реакцией образования кремния следует считать реакцию взаимодействия монооксида кремния с карборундом:



Получение  $\text{Si}_{\text{техн}}$  в РТП ведется непрерывным способом по технологической схеме (рис. 1).



**Рис. 1. Технологическая схема получения кремния в рудно-термических печах на ЗАО «Кремний» (Иркутская обл., г. Шелехов).**

Сырьем для получения кремния могут служить кварц, кварцит, кварцитовидные песчаники, гранулированный кварц и др. В качестве УВ используют каменный уголь различных производителей, нефтяной кокс, древесный уголь [2].

На крупнейшем в России заводе ЗАО «Кремний» (г. Шелехов) производство кремния металлургических марок осуществляется в трехфазных трехэлектродных открытых вращающихся печах мощностью 16,5 и 25 МВ•А, работающих на переменном токе, с температурой рабочей зоны  $\approx 2200$  °С. РТП оснащены угольными электродами отечественного производства. В качестве сырья используется кварцит Черемшанского месторождения (рудник является подразделением ЗАО).

Непосредственная оценка условий восстановления и выплавки кремния в РТП практически невозможна: это связано с высокими температурами процесса, сложностью физико-химических превращений. Поэтому для исследования изучают методы моделирования.

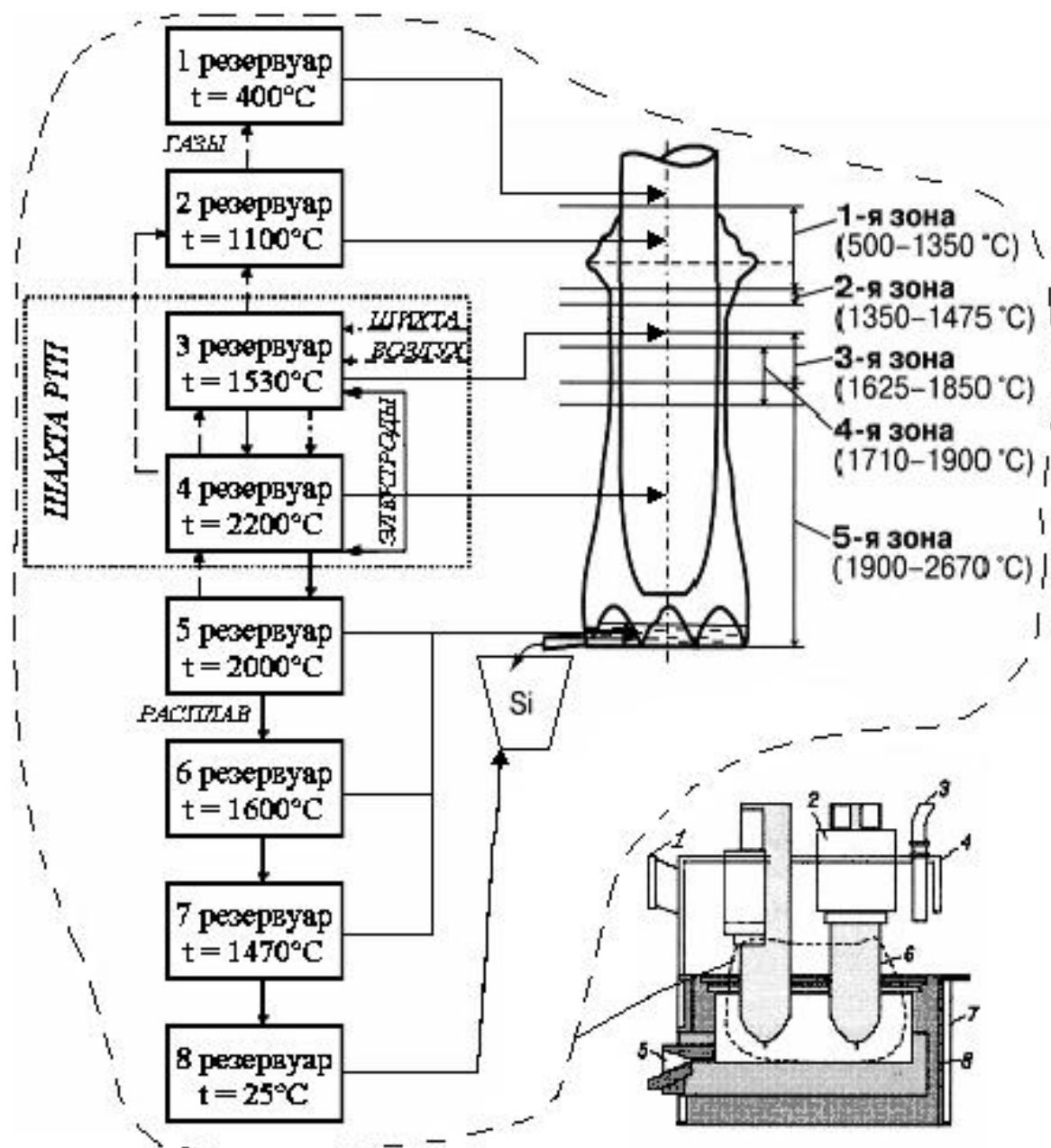
В наших исследованиях с помощью программного комплекса (ПК) «Селектор» [3] была сформирована восьмirezервуарная термодинамическая (ТД) модель (рис. 2), которая наиболее полно имитирует процесс получения кремния в РТП. Данная модель позволяет описать процесс восстановления кремнезема в печи и распределение примесей по температурным зонам, химический состав фазовых превращений в РТП и их количественные характеристики [4].

1-й и 2-й резервуары имитируют колошниковое пространство РТП и имеют температуры, °С, соответственно: 400 и 1100. В эти резервуары поступают газопылевые выбросы, образующиеся в нижних зонах печи.

Шахта печи состоит из двух резервуаров. Верхний горизонт шахты РТП (3-й резервуар) – с температурой 1530 °С (температура появления SiC), нижний горизонт РТП (4-й резервуар) – с температурой 2200 °С. В 3-й резервуар осуществляется подача шихты. В 4-м резервуаре происходит максимальное извлечение и накопление кремния (как за счет протекания промежуточных реакций, так и за счет непосредственного образования технического кремния из его оксида в зоне горения вольтовой дуги).

5-й резервуар модели – тигель РТП (с температурой 2000 °С), где заканчивается протекание реакций в той шихте, которая проваливается из 3-го резервуара, не успев прореагировать. Также в данном резервуаре происходит накопление жидкого кремния.

6-й резервуар модели с температурой 1600 °С имитирует расплав кремния, поступающий в летку РТП.



**Рис. 2. Схема модели и РТП с температурными зонами (резервуарами):**

- 1 – газоход, 2 – подвесные щитки, 3 – трубочка, 4 – зонт, 5 – летка,  
6 – электрод, 7 – кожух, 8 – футеровка.

7-й резервуар модели имеет температуру 1470 °C и имитирует выпуск кремния из РТП с началом его кристаллизации.

8-й резервуар предназначен для сопоставления полученных данных моделирования по закристаллизованному кремнию (температура 25 °C).

В результате решения 8-резервуарной модели был получен расплав кремния следующего состава (рис. 3).

Dependent components:			
	gT	mole	weight %
melt			
Mn	-28041	8.054787948145e-05	0.00
MnSi	-68858	2.630765412120e-02	0.03
Cr	-20953	4.584699567977e-03	0.00
Ni	-25381	9.677529424680e-03	0.01
Al	-25779	7.981029097002e+00	2.50
B	-8631	1.079177722912e-02	0.00
Ca	-31171	7.283849742867e-01	0.34
Fe	-25440	2.957778335351e+00	1.92
Fe3C	-100087	4.655640902685e-04	0.00
FeO	-108357	1.721968959173e-05	0.00
FeS	-80203	7.866279303520e-06	0.00
K	-40494	1.817207538064e-05	0.00
KCN	-106582	7.577216932352e-07	0.00
Mg	-27270	1.923379575835e-02	0.01
Mg2Si	-92094	1.665494163638e-04	0.00
Mg2SiO4	-593992	1.389458836963e-05	0.00
MgAl2O4	-612812	6.211113508118e-03	0.01
MgSiO3	-422436	2.592331747932e-03	0.00
Na	-35359	8.007939172407e-05	0.00
P	-27932	1.010779543557e-01	0.04
S	-28660	7.232382437090e-07	0.00
Si	-19117	2.899014191781e+02	94.56
SiO2	-248075	2.275920329314e-01	0.16
Ti	-24843	3.107088034511e-04	0.00
TiC	-64867	4.018846762598e-02	0.03
TiO	-158333	1.438503472902e-03	0.00
TiO2	-260072	1.314879424903e-06	0.00

Рис. 3. Состав расплава кремния по модели (при  $t = 2000\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 5-й резервуар).

На рисунке 4 показано накопления кремния в пятом и восьмом резервуаре, что говорит об адекватности модели, т.к в 5-м резервуаре идёт накопление жидкого кремния.

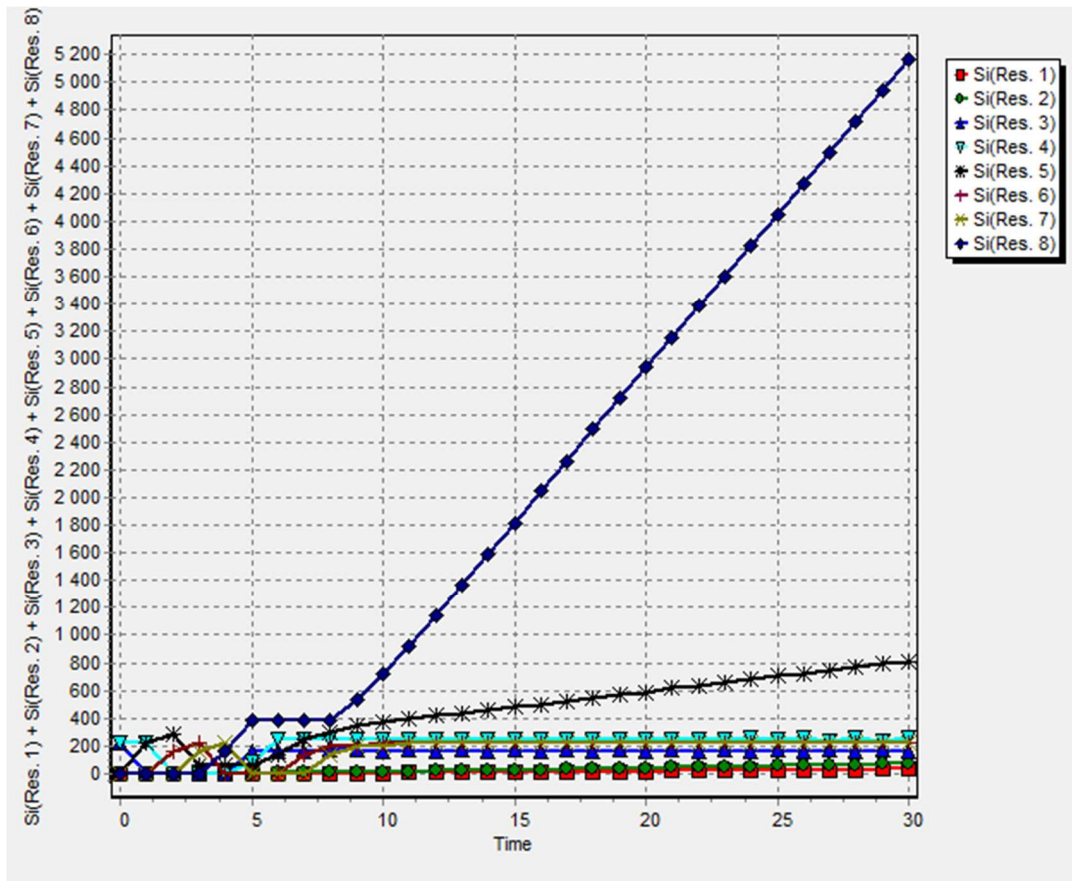
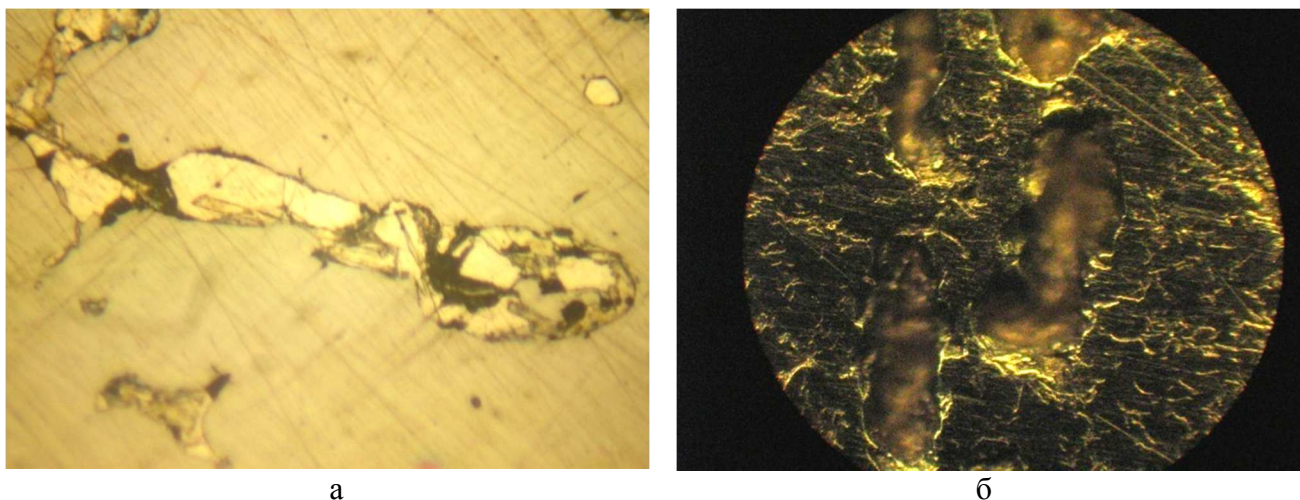


Рис. 4. Динамика распределения кремния по резервуарам в модели.

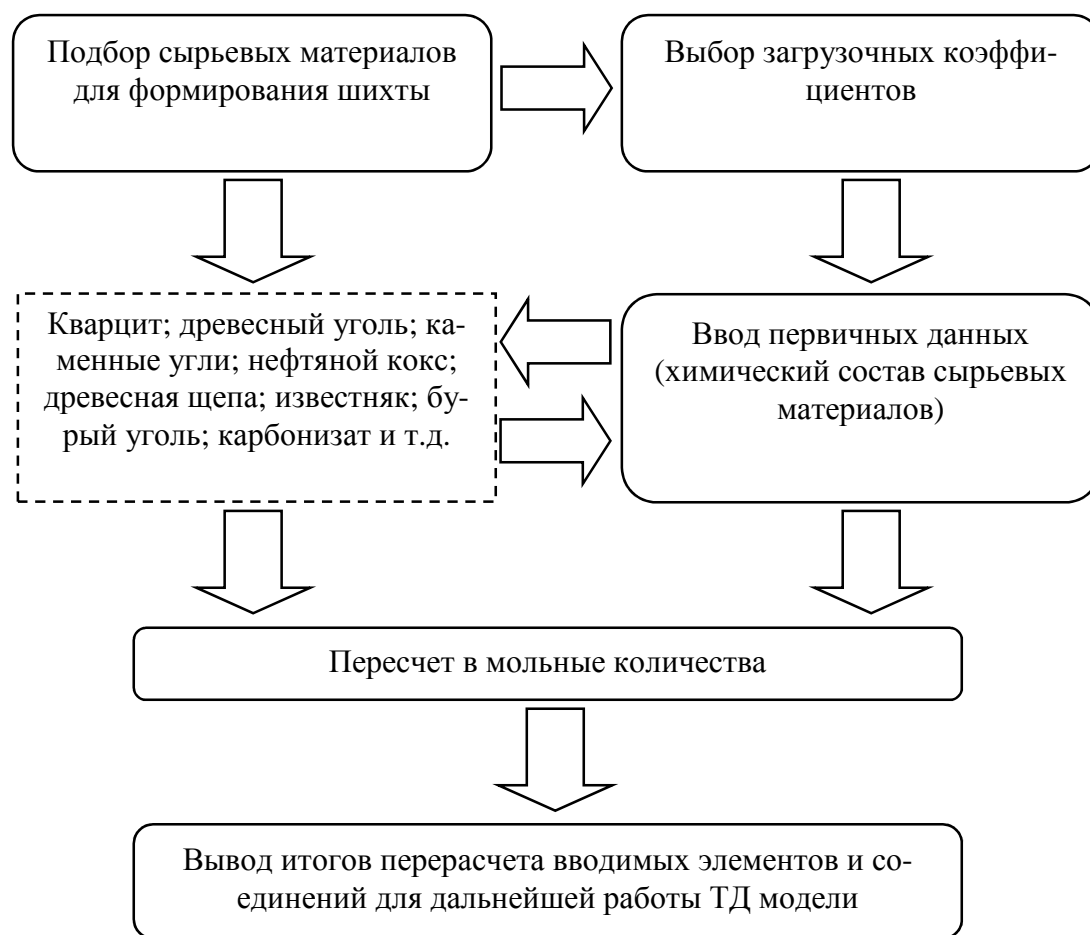
На рисунке 5 отображены результаты исследований образцов технического кремния металлографическим методом анализа [5].



**Рис. 5. Виды примесных включений в образце технического кремния (металлографические исследования):**  
**а – интерметаллиды; б – включение, содержащее железо и марганец.**

Следовательно, данная физико-химическая восьмirezервуарная модель позволяет нам прогнозировать: извлечение кремния при любом химическом составе исходных сырьевых материалов (в частности, возможно проанализировать снижение потерь Si с отходящими газами); химический состав чернового кремния на выходе из печи; состав пылегазовых выбросов (что позволяет оценить влияние вредных выбросов на экологическую обстановку в регионе); количество образовавшегося шлака в печи, влияющее на простои РТП.

Нами также была разработана программа (на языке программирования C++) «Программа подготовки данных для ввода в физико-химические модели технологических процессов (версия 1)» по перерасчету исходных данных химического состава сырья (с учетом загрузочных коэффициентов шихты) для ввода в ТД (рис. 6), с помощью которой можно варьировать данные по химическому составу сырья, поступающего в процесс [6].



**Рис. 6. Блок-схема компьютерной программы.**

### **Заключение**

Таким образом, методы моделирования позволяют выбрать оптимальную загрузку сырья, тем самым оценить возможность возникновения производственных рисков и предложить пути их минимизации (снижение расхода электроэнергии; уменьшение простоя печи; контроль отходящих газов по их количественному и химическому составам) при производстве металлургического кремния.

### **Список литературы**

1. Немчинова Н.В. Кремний: свойства, получение, применение : учеб. пособие / Н.В. Немчинова, В.Э. Клёц. – Иркутск : Изд-во ИрГТУ, 2008. – 272 с.
2. Катков О.М. Выплавка технического кремния : учеб. пособие / под ред. О.М. Каткова. – 2-е изд. – Иркутск : Изд-во ИрГТУ, 1999. – 243 с.
3. Карпов И.К. Физико-химическое моделирование на ЭВМ в геохимии / под общ. ред. И.К. Карпова. – Новосибирск : Наука, 1981. – 247 с.

4. Немчинова Н.В., Бельский С.С., Тимофеев А.К. Исследование процесса карботермического получения кремния в электродуговых печах // Технология металлов. – М. : Наука и технология. – 2012. – № 6. – С. 3-9.
5. Немчинова Н.В., Гусева Е.А., Константинова М.В. Металлографическое исследование рафинированного технического кремния // Вестник ИрГТУ. – Иркутск, 2010. – № 5 (45). – С. 207-211.
6. Программа подготовки данных для ввода в физико-химические модели технологических процессов (версия 1) : свидетельство № 2011614945, Российская Федерация / Н.В. Немчинова, С.С. Бельский, А.К. Тимофеев; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО ИрГТУ. – № 2011613098, заявл. 29.04.2011; опубл. 23.06.2011.

**Рецензенты:**

Зелинская Е.В., д.т.н., профессор кафедры «Обогащение полезных ископаемых и инженерной экологии», ФГБОУ ВПО «Иркутский государственный технический университет», г. Иркутск.

Белоусова Н.В., д.х.н., заведующая кафедрой «Металлургия цветных металлов» ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск.