

## Моделирование процесса окислительного обжига цинкового концентрата в среде Python 3.0

Р. В. Куртенков, В. А. Слободин, Е. В. Сизякова  
Санкт-Петербургский горный университет  
Кафедра металлургии  
E-mail: [victorslobodin2002@mail.ru](mailto:victorslobodin2002@mail.ru)

### **Аннотация**

*В работе рассматривается технология первого металлургического передела цинкового концентрата, а именно окислительного обжига. Разработана программа для моделирования процесса обжига цинкового концентрата, описывающая движение материальных потоков. Помимо расчётных массовых и процентных значений она позволяет получить графическую информацию о составе продуктов. В дальнейшем планируется написание подобных программ, описывающих движение материальных потоков, тепловых балансов, кинетики, термодинамики других металлургических процессов.*

### **Введение**

К настоящему времени человечество освоило производство более 70 металлов. Технологическая цепочка получения некоторых из них может включать десятки процессов, проводимых в разнообразных металлургических аппаратах. Технологическим процессом (ТЕП) называется совокупность всех процессов, реализуемых в аппарате при переработке исходного сырья в конечные продукты [1].

Исследование сложных объектов с помощью их упрощённых моделей является очень плодотворным и широко используется в различных отраслях знаний.

Модель – это объект, который отражает основные, наиболее характерные черты изучаемого предмета или процесса, интересующие исследователя в данный момент времени. Она должна отражать не все свойства объекта, а только необходимые для решения конкретной задачи. Следовательно, в зависимости от целей исследования, для одного и того же объекта могут быть созданы различные модели [1].

### **Актуальность работы**

Процесс окислительного обжига цинкового концентрата применяется при производстве цинка как по традиционной пирометаллургической, так и по развивающийся в современном мире гидрометаллургической технологии [2,3], а расчёты, необходимые для проведения данной операции очень трудоёмки и занимают большое количество времени, например, студенты, изучающие дисциплину

«Металлургическая теплотехника и основы печных технологий» на расчёт материального баланса процесса обжига тратят от 8 до 10 академических часов. Исследование окислительного обжига является необходимым для получения профессиональных навыков студентами, изучающих технологии металлургии цветных металлов и пирометаллургическое оборудование. Для улучшения качества образовательного процесса при изучении данной темы кафедрой металлургии было предложено разработать программное приложение в среде Python 3.0 для расчета материальных потоков процесса обжига цинкового концентрата.

### **Цели, задачи и методы исследования**

Целью исследования является компьютерное моделирование процесса окислительного обжига цинкового концентрата. Исходя из поставленной цели, были сформулированы следующие задачи:

1. Разработка и отладка программного кода для расчёта рационального состава исходного концентрата, рациональных составов продуктов обжига: огарка и пыли, состава отходящих газов и материального баланса процесса.

2. Разработка и отладка программного кода для построения круговых диаграмм элементных и вещественных составов концентрата, огарка и пыли и состава отходящих газов.

Они были достигнуты посредством следующих методов: статистическая обработка данных, сравнительный анализ, идеализация,

аналогия, обобщения и математического моделирования. Используются теоретические зависимости по процессу окислительного обжига, описанные в Диомидовский Д.А. в работе «Расчеты пиропроцессов и печей цветной металлургии» [4]. Моделирование проходило в среде Python 3.0 по методикам, описанным

Шариков Ю.В. «Моделирование процессов и объектов в металлургии» [1]. Для ввода и вывода численных значений использованы книги Excel. Для решения поставленных задач был разработан следующий укрупнённый алгоритм (рис. 1).

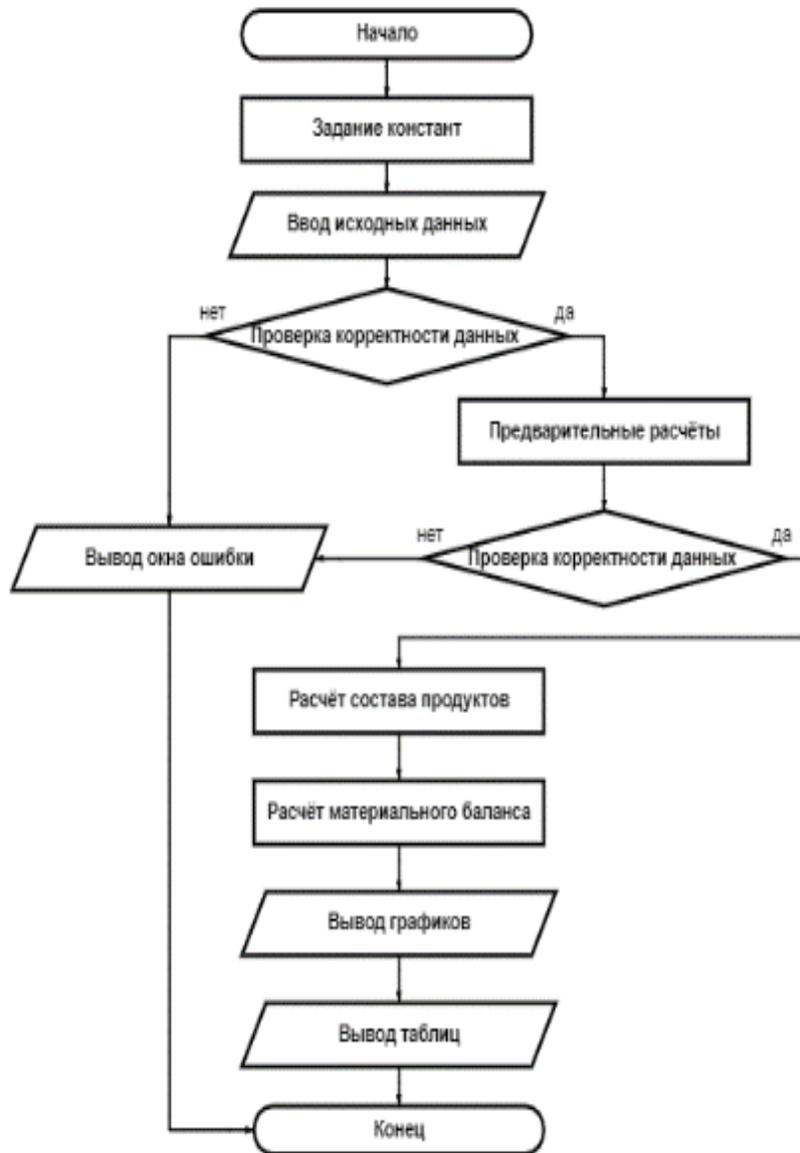


Рисунок 1 –Алгоритм работы программы

### Теория процесса окислительного обжига цинкового концентрата

Цинк – светло-серый металл с синеватым оттенком. На воздухе он покрывается пленкой основного карбоната  $ZnCO_3 \cdot 3Zn(OH)_2$  серого цвета, которая является весьма плотной и хорошо защищает цинк от дальнейшей коррозии [2].

Цинк широко используется для защиты железа от коррозии (30-60 % в разных странах от общего потребления). Наиболее

распространенными сплавами, содержащими цинк, являются латуни и сплавы для литья под давлением. Оксид и сульфид цинка используются в качестве пигментов.

Существуют два типа цинксодержащих руд: сульфидные и оксидные. Главными природными сульфидными минералами цинка являются сфалерит  $ZnS$  и марматит  $(Zn, Fe)S$ . Для цинка характерна связь в рудах со свинцом, часто и с медью [2].

Средний химический состав сульфидных цинковых концентратов, являющихся основным природным сырьем для производства цинка, %: Zn 45-60, Pb 0,1-3,0, Cu 0,2-3,0, Cd 0,1-0,5, Fe 5-13, S 29-35, SiO<sub>2</sub> 0,4-4. Их можно перерабатывать как пирометаллургическим, так и гидromеталлургическим методом. В настоящее время более 80 % от общего производства цинка приходится на гидromеталлургическую технологию [3]. Окислительный отжиг – первая операция в обоих методах переработки цинковых концентратов, целью которой является перевод сульфида цинка и сульфидов других металлов в форму оксидов.

При окислении сульфидов металлов выделяется большое количество тепла, что обеспечивает возможность проведения процесса обжига без других источников энергии [2].

### Результаты

Разработанная программа использует модель с заданным минералогическим составом, включающим в себя:

- сфалерит (ZnS),
- галенит (PbS),
- халькопирит (CuFeS<sub>2</sub>),
- гриконит (CdS),
- пирит (FeS<sub>2</sub>),
- пирротин (Fe<sub>7</sub>S<sub>8</sub>),
- кварц (SiO<sub>2</sub>),
- корунд (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) [4].

Программа использует следующие исходные данные:

- элементный состав сухого концентрата;

- производительность печи по сухому концентрату;
- влажность концентрата;
- коэффициент избытка воздуха;
- содержание кислорода в воздухе

Разработанная программа обеспечивает получение следующих выходных данных:

- таблица рационального состава исходного концентрата;
- таблица материального баланса (рис. 2);
- таблица рационального состава огарка (рис. 3);
- таблица рационального состава пыли;
- таблица состава отходящих газов;
- значение степени десульфуризации;
- значение удельного количества воздуха, требуемое для проведения процесса.

А также перечень графического материала:

- круговая диаграмма вещественного состава исходного концентрата;
- круговая диаграмма элементного состава исходного концентрата;
- круговая диаграмма вещественного состава огарка (рис. 4);
- круговая диаграмма элементного состава огарка (рис. 4);
- круговая диаграмма вещественного состава пыли;
- круговая диаграмма элементного состава пыли;
- круговая диаграмма состава отходящих газов.

### Материальный баланс

№ п/п	Приход	кг	%	№ п/п	Расход	кг	%
1.	Концентрат:	191,489	31,037	1.	Огарок	92,713	15,062
	Zn	90	47		Zn	54	57,954
	Pb	2,7	1,41		Pb	1,62	1,739
	Cu	1,8	0,94		Cu	1,08	1,159
	Cd	0,54	0,282		Cd	0,324	0,348
	Fe	14,4	7,52		Fe	8,64	9,273
	S	57,6	30,08		S(S)	0,371	0,398
	H <sub>2</sub> O	11,489	6		S(SO <sub>4</sub> )	0,927	0,995
	SiO <sub>2</sub>	5,04	2,632		SiO <sub>2</sub>	3,024	3,245
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,4	2,82		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,24	3,477
	прочие	2,52	1,316		прочие	1,512	1,623
2.	Воздух:	425,473	68,963	2.	Пыль	64,473	10,474
	O <sub>2</sub>	97,859	23		Zn	36	55,01
	N <sub>2</sub>	327,614	77		Pb	1,08	1,65
					Cu	0,72	1,1
					Cd	0,216	0,33
					Fe	8,64	8,802
					S(S)	0,322	0,493
					S(SO <sub>4</sub> )	1,934	2,956
					SiO <sub>2</sub>	2,016	3,081
					Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,16	3,301
					прочие	1,008	1,54
				3.	Отходящие газы	458,342	74,463
					SO <sub>2</sub>	107,981	23,559
					O <sub>2</sub>	97,859	2,456
					N <sub>2</sub>	327,614	71,478
					H <sub>2</sub> O	11,489	2,507
	<b>Итого:</b>	<b>616,962</b>	<b>100</b>		<b>Итого:</b>	<b>615,528</b>	<b>100</b>

Рисунок 2 - Выходные данные программы. Таблица результатов расчёта материального баланса

Рациональный состав огарка																									
Соединения	Zn		Pb		Cu		Cd		Fe		S(SO4)		S(S)		O2		SiO2		Al2O3		Прочие		Итого		
	кг	%	кг	%	кг	%	кг	%	кг	%	кг	%	кг	%	кг	%	кг	%	кг	%	кг	%	кг	%	
ZnO	51,704	55,489													12,655	13,581							64,358	69,07	
ZnSO4	1,54	1,653									0,756	0,811			1,508	1,618							3,804	4,083	
ZnS	0,756	0,811											0,371	0,398									1,127	1,209	
PbO			0,81	0,869											0,063	0,067							0,873	0,936	
PbSO4			0,81	0,869							0,125	0,135			0,25	0,269							1,186	1,272	
CdO							0,162	0,174							0,023	0,025							0,185	0,199	
CdSO4							0,162	0,174			0,046	0,05			0,092	0,099							0,3	0,322	
Cu2O					1,08	1,159									0,136	0,146							1,216	1,305	
Fe2O3									8,64	9,273					3,713	3,985							12,353	13,257	
SiO2																	3,024	3,245					3,024	3,245	
Al2O3																			3,24	3,477			3,24	3,477	
Прочие																						1,512	1,623	1,512	1,623
<b>Итого</b>	<b>54</b>	<b>57,954</b>	<b>1,62</b>	<b>1,739</b>	<b>1,08</b>	<b>1,159</b>	<b>0,324</b>	<b>0,348</b>	<b>8,64</b>	<b>9,273</b>	<b>0,927</b>	<b>0,995</b>	<b>0,371</b>	<b>0,398</b>	<b>18,439</b>	<b>19,79</b>	<b>3,024</b>	<b>3,245</b>	<b>3,24</b>	<b>3,477</b>	<b>1,512</b>	<b>1,623</b>	<b>93,177</b>	<b>100</b>	

Рисунок 3 Выходные данные программы. Таблица результатов расчёта рационального состава огарка.

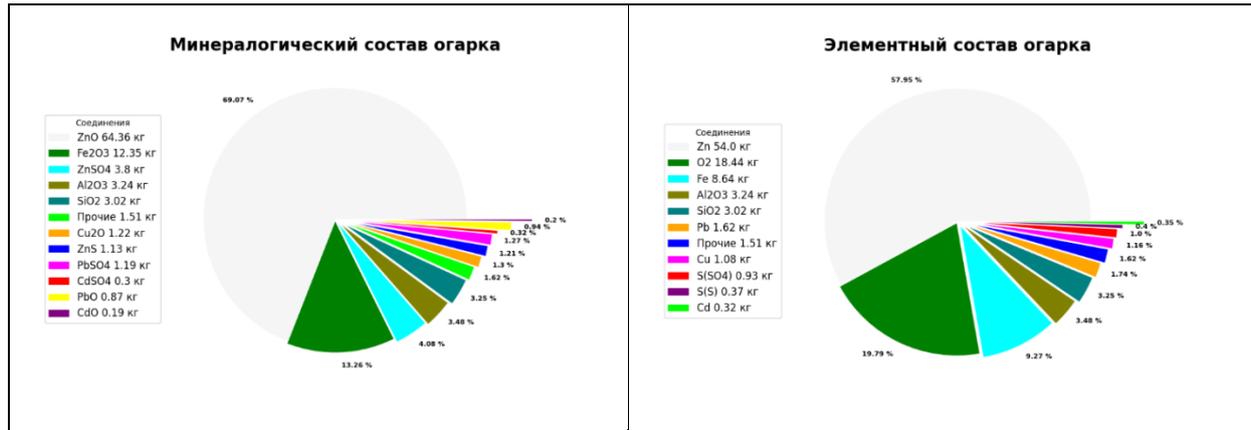


Рисунок 4 - Выходные данные программы. Круговые диаграммы минералогического и элементного составов цинкового огарка

### Заключение

Приложение получило положительную оценку преподавателей кафедры металлургии Санкт-Петербургского горного университета. Применение программы планируется для обучения студентов бакалавров по специальности 15.03.04 - Автоматизации технологических процессов и производств, профиль: «Автоматизация технологических процессов и производств в металлургической промышленности» в рамках дисциплины «Пирометаллургическое оборудование» и по специальности 22.03.02 - Металлургия, профиль: «Металлургия цветных металлов» в рамках дисциплины «Металлургическая теплотехника и основы печных технологий». Студенты на практических занятиях получают задание в виде расчета теплового баланса процесса, печи для проведения обжига и системы газоочистки.

Для выполнения указанных расчётов им необходимо предварительно рассчитывать материальный баланс, количество и состав газовой фазы, хотя внимание на этот аспект обращено на других дисциплинах.

С помощью разработанной программы студенты смогут индивидуально рассчитывать данные по материальным потокам процесса и оперативно переходить непосредственно к расчету по теме практического занятия. Также

возможно применение программы для разработки вариантов расчётно-графической работы (курсовой работы) по предмету «Теория пирометаллургических процессов». В дальнейшем планируется написание подобных программ, описывающих движение материальных потоков, тепловых балансов, кинетики, термодинамики других металлургических процессов.

### Апробация работы

По итогам работы было получено свидетельство на программу для ЭВМ №2023612749 «Программа для моделирования процесса обжига цинкового концентрата», авторы: Слободин В.А., Куртенков Р.В., Сизякова Е.В. [5].

### Литература

1. Шариков, Ю. В. Моделирование процессов и объектов в металлургии: учеб. пособие / Ю. В. Шариков, И. Н. Белоглазов, А.Ю. Фирсов. - Санкт-Петербургский государственный институт (технический университет). СПб, 2006. – 83 с.
2. Орлов, А. К. Основы производства и обработки металлов: Учебное пособие / А. К. Орлов, Г. В. Коновалов. - Санкт-

Петербургский государственный горный институт (технический университет). СПб, 2006. - 115 с.

3. Shao, S., Ma, B., Wang, C. et al. A Review on the Removal of Magnesium and Fluoride in Zinc Hydrometallurgy. *J. Sustain. Metall.* 8, 25–36 (2022). <https://doi.org/10.1007/s40831-022-00500-4>

4. Диомидовский, Д. А. Расчеты пиропроцессов и печей цветной металлургии: [Учеб. пособие для металлургич. вузов и фак.] / Д. А. Диомидовский, Л. М. Шалыгин, А. А. Гальнбек, И. А. Южанинов ; Под науч. ред.

проф. д-ра техн. наук Д. А. Диомидовского. - Москва: Metallurgizdat, 1963. - 459 с.

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023612749 Российская федерация. Программа для моделирования процесса обжига цинкового концентрата : заявлено 20.01.2023 : опубликовано 07.02.2023 / Слободин В.А., Куртенков Р.В., Сизякова Е.В. ; правообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет», Бюл. № 2. – Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ.

**Куртенков Р.В., Слободин В.А., Сизякова Е.В. Моделирование процесса окислительного обжига цинкового концентрата в среде Python 3.0.** В работе рассматривается технология первого металлургического передела цинкового концентрата, а именно окислительного обжига. Разработана программа для моделирования процесса обжига цинкового концентрата, описывающая движение материальных потоков. Помимо расчётных массовых и процентных значений она позволяет получить графическую информацию о составе продуктов. В дальнейшем планируется написание подобных программ, описывающих движение материальных потоков, тепловых балансов, кинетики, термодинамики других металлургических процессов

**Ключевые слова:** технология, цинковый концентрат, окислительный обжиг, программа моделирования

**Kurenkov R.V., Slobodin V.A., Sizyakova E.V. Modeling of the process of oxidative firing of zinc concentrate in Python 3.0 environment.** The paper considers the technology of the first metallurgical conversion of zinc concentrate, namely oxidative firing. A program has been developed for modeling the process of firing zinc concentrate, describing the movement of material flows. In addition to the calculated mass and percentage values, it allows you to get graphical information about the composition of products. In the future, it is planned to write similar programs describing the movement of material flows, thermal balances, kinetics, thermodynamics of other metallurgical processes.

**Keywords:** technology, zinc concentrate, oxidative roasting, simulation program.

Статья поступила в редакцию 07.05.2023

Рекомендована к публикации профессором Павлышом В. Н.