

МЕТАЛЛУРГИЯ ТЯЖЕЛЫХ И БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ

*Методические указания по курсовому проектированию
для студентов магистратуры направления 22.04.02*

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2020**

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
Санкт-Петербургский горный университет

Кафедра металлургии

МЕТАЛЛУРГИЯ ТЯЖЕЛЫХ И БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ

*Методические указания по курсовому проектированию
для студентов магистратуры направления 22.04.02*

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2020

УДК 669.334 (073)

МЕТАЛЛУРГИЯ ТЯЖЕЛЫХ И БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ:

Методические указания по курсовому проектированию / Санкт-Петербургский горный университет. Сост. *Г.В. Петров, А.Я. Бодуэн, С.Б. Фокина*. СПб, 2020. 43 с.

Приведены методические указания и пример расчета для выполнения курсового проекта по дисциплине «Металлургия тяжелых и благородных металлов». Курсовой проект предусматривает расчеты материального и теплового балансов, выбор основных агрегатов и чертеж аппаратурно-технологической схемы металлургического процессов.

Предназначены для студентов магистратуры направления 22.04.02 «Металлургия» программы подготовки «Металлургия цветных металлов».

Научный редактор доц. *В.Н. Бричкин*

Рецензент канд. техн. наук *Ю.В. Андреев* (ООО НПК «Технолит»)

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ КУРСОВОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Курсовой проект представляет собой законченную разработку, демонстрирующую уровень усвоения теоретических знаний, полученных магистрантом в процессе изучения дисциплины «Металлургия тяжелых и благородных металлов», и способности применить эти знания в решении профессиональных задач. Выполнение курсового проекта характеризует полноту и глубину полученных знаний по данной дисциплине и способность магистранта к самостоятельной проработке вопросов, решаемых в технологической части проекта металлургического производства.

В ходе курсового проектирования магистрант должен:

- выбрать интересующую тематику работы, соприкасающуюся как со спецификой данного курса, так и с кругом профессиональных интересов, либо сформулировать стоящую перед ним в данной области проблему, требующую решения;
- подобрать достаточное количество литературы по выбранной тематике;
- сформулировать основные проблемы, существующие в исследуемой области;
- конкретизировать на основании найденной информации тему курсового проекта, наметить план изложения;
- разработать конкретные проектные решения по выбранной теме.

2. ОРГАНИЗАЦИЯ ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

Курсовой проект выполняют магистранты по индивидуальному заданию параллельно с прохождением основного курса. Для руководства курсовым проектированием назначается руководитель (консультант) из числа преподавателей кафедры металлургии.

В обязанности руководителя курсового проекта входит:

- согласование с магистрантом темы курсового проекта, выдача задания, рекомендация необходимой учебной и справочной литературы;

- проведение консультаций по методам выполнения расчетов, обоснованию принимаемых решений, разработке графической части и другим вопросам, относящимся к курсовой работе;

- осуществление текущего контроля самостоятельной работы магистранта, проверка законченного курсового проекта и участие в его защите.

Курсовой проект необходимо выполнить в сроки, предусмотренные учебным графиком, и в указанное время представить её на кафедру для проверки и назначения даты защиты.

Курсовой проект должен отражать современный уровень металлургической промышленности и перспективы дальнейшего ее развития; учитывать опыт работы передовых предприятий; иметь научную или практическую ценность.

Тема курсового проекта выбирается магистрантом и утверждается руководителем.

Примерные темы курсовых проектов по курсу «Металлургия тяжелых и благородных металлов» может относиться к одному из следующих типов:

1. Технология кучного выщелачивания золотосодержащего забалансового сырья.

2. Гидрометаллургическая технология переработки низкосортных медных концентратов.

3. Технологии автоклавного выщелачивания упорного золотосодержащего сырья.

4. Плавка сульфидного свинцово-цинкового сырья в агрегате КИВЦЭТ-ЦС.

В результате выполнения курсового проекта составляется пояснительная записка и графическая часть (чертеж).

а. Графическая часть курсового проекта выполняется на листе форматом А1 (594×841 мм) в соответствии с методическими указаниями по оформлению курсовых проектов, подготовленными кафедрой начертательной геометрии и графики, где должна быть представлена схема цепи аппаратов и установочный чертеж выбранного основного оборудования. Эти чертежи используют при монтаже оборудования, поэтому на них не следует приводить

излишних деталей конструкции, достаточно начертить общий вид оборудования (в одной или двух проекциях), указать все установочные и габаритные размеры, показать возможность монтажа в цехе.

Конкретное содержание чертежей следует согласовать с руководителем курсового проекта.

б. Пояснительная записка должна быть выполнена на одной стороне листа с полями без сокращений и помарок и оформлена в соответствии с правилами, установленными в Горном университете для курсовых и аттестационных работ. Основные разделы пояснительной записки: введение, краткое описание технологического процесса, характеристика основного оборудования и расчеты, библиографический список

В общем случае может быть рекомендована следующая структура пояснительной записки: 1. Задание на выполнение курсового проекта; 2. Титульный лист пояснительной записки; 3. Аннотация; 4. Оглавление; 5. Введение; 6. Текст пояснительной записки; 7. Заключение; 8. Список использованных источников; 9. Приложение.

Во введении коротко отражается актуальность курсового проекта и его цель. Задачи исследуемого объекта и его роль в общей технологической схеме металлургического предприятия. Требования к выпускаемой ими продукции. Источниками информации для решения указанных вопросов являются учебники, монографии, издания периодической литературы, отчеты научно-исследовательских институтов, материалы, собранные во время производственной практики.

Обязательным разделом пояснительной записки является обоснование целесообразности реализации объекта проектирования, которое включает выявление экономической целесообразности и технической возможности технологического объекта, путей повышения технико-экономических показателей процесса и способов оптимизация его параметров; учет взаимосвязи принимаемых технологических решений и экологических и социально-экономических последствий. Для решения указанных вопросов необходим анализ и сопоставление возможных методов и

вариантов металлургической переработки сырья, позволяющий обосновать выбор технологии и металлургического аппарата.

Технологический раздел – основной элемент курсового проекта по объему, содержанию и глубине проработки рассматриваемых в ней вопросов. Раздел содержит основную часть расчетных материалов, в связи с чем, автору работы предоставляется широкая возможность самостоятельного анализа и творческого решения различных технологических вопросов. Физико-химическое описание процесса в качестве обязательного включает общую физико-химическую характеристику процесса; установление всей совокупности химических реакций, физико-химических равновесий и скоростных характеристик процесса, определяющих параметры и показатели процесса

Технологические расчеты в общем случае включают расчеты материального и теплового балансов процесса, потребного количества основных металлургических агрегатов, их геометрических размеров и других характеристик; материальных потоков металлургического передела, участка, цеха. Металлургические расчеты обычно проводятся на 100 кг исходного металлургического сырья. Материальный баланс пересчитывается на суточную или годовую производительность. Расчет основного металлургического оборудования, принятого в работе, проводится по материалам, изложенным в специальных пособиях.

Защита курсовых проектов проводится как индивидуально, так и группами, ведущему преподавателю или кафедральной комиссии. При защите курсового проекта магистранту предоставляется время для доклада по существу выполненной работы и принятых проектных решений. На доклад отводится 10 минут, не более.

Делать доклад рекомендуется по следующему плану:

1. Тема и ее значение для технологии производства металлов.

2. Исходные данные для курсового проекта.

3. Краткая характеристика технологии производства, используемых технологических процессов и оборудования. Постановка задачи инженерных расчетов.

4. Ознакомление с сутью выполненных расчетов, принятых инженерных решений и окончательными результатами.

5. Характеристика графической части курсового проекта и решаемых в нем задач.

6. Оценка принятых проектных решений по сравнению с уровнем, достигнутым современной металлургической промышленностью.

По окончании доклада преподаватель или члены кафедральной комиссии могут задать любые вопросы, имеющие отношение к теме курсовой работе. Затем выставляется оценка с учетом сделанного доклада и ответов на вопросы, степени проработки проектных решений и правильности выполненных расчетов, оформления пояснительной записки и графической части.

3. ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

3.1. ЗАДАНИЕ

Курсовой проект выполняется по теме: «Расчет плавки на штейн сульфидного медного концентрата способом «Аусмелт»».

В настоящее время в мире работает более 20 печей «Аусмелт». В данном процессе используется вертикальная цилиндрическая печь (высота 13 м, диаметр 4,5 м), оборудованная погружной вертикальной фурмой длиной до 17 м и диаметром 0,5 м (рис. 2.5), состоящей из концентрически расположенных стальных труб. Фурму закрепляют на подъемнике, расположенном над печью в центральной ее части. Номинальное заглубление горелки в шлак составляет 20 см, что обеспечивает турбулентное перемешивание расплава. По мере разрушения концевой части фурмы ее опускают без остановки работы печи. Фурму заменяют, когда разрушится примерно 1 м ее концевой части, и затем восстанавливают, приваривая новую концевую часть.

Топливо (природный газ, до 1800 м³/ч) в смеси с воздухом сгорает в нижней части фурмы. Воздух подают в полость, образованную кожухом и внутренней трубой, в результате чего охлаждается корпус фурмы и образуется на его поверхности слой защитного гарниссажа. Концентрация кислорода в дутье составляет около 45 %, при этом концентрация SO₂ в отходящих газах достигает 35 %, а извлечение серы – 98 %. Шлак (6...8 % Cu) подвергается электропечному обеднению. Печь отличается простотой конструкции, высокой производительностью (тыс. т/год: 45 – по штейну с концентрацией меди до 58 % Cu, 600 – по концентрату), малым пылевыносом (около 1 %), простотой в управлении, так как изменением заглубления фурмы в слой шлака регулируется интенсивность барботажа расплава. Процесс может быть прерван при поднятии фурмы, когда металлическая или штейновая фаза отстаивается перед выпуском из печи. Достоинством технологии является также и то, что печь может быть остановлена или находиться на горячем холостом ходу в течение длительного периода и при этом имеется возможность ее оперативного разогрева.

3.2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ

Расчеты представлены в соответствии с технологической схемой процесса (рис. 1) и следующими исходными данными:

1) концентрация в медном концентрате Cu, мас. %	14,84
2) концентрация в медном концентрате Fe, мас.%	25,76
3) концентрация в медном концентрате Zn, мас. %	4,50
4) концентрация в медном концентрате S, мас. %	32,72
5) концентрация в медном концентрате SiO ₂ , мас. %	9,60
6) концентрация в медном концентрате CaO, мас. %	1,15
7) концентрация в медном концентрате H ₂ O, мас. %	6,50
8) концентрация в оборотном концентрате Cu, мас. %	8,67
9) концентрация в оборотном концентрате Fe, мас. %	41,22
10) концентрация в оборотном концентрате Zn, мас. %	0,92
11) концентрация в оборотном концентрате S, мас. %	6,60

12) концентрация в оборотном концентрате SiO_2 , мас. %	20,92
13) концентрация в оборотном концентрате CaO , мас. %	1,12
14) концентрация в оборотном концентрате H_2O , мас. %	5,55
15) концентрация в клинкере Cu , мас. %	4,36
16) концентрация в клинкере Fe , мас. %	36,80
17) концентрация в клинкере Zn , мас. %	2,50
18) концентрация в клинкере S , мас. %	4,70
19) концентрация в клинкере C , мас. %	12,00
20) концентрация в клинкере SiO_2 , мас. %	12,20
21) концентрация в клинкере CaO , мас. %	4,80
22) концентрация в клинкере H_2O , мас. %	11,30
23) массовое соотношение в клинкере $\text{Fe}_{\text{метал}} / \text{Fe}_{\text{общ}}$, ед	0,32
24) концентрация в кварцевом флюсе Fe , мас. %	6,50
25) концентрация в кварцевом флюсе S , мас. %	0,30
26) концентрация в кварцевом флюсе SiO_2 , мас. %	67,30
27) концентрация в кварцевом флюсе CaO , мас. %	7,00
28) концентрация в кварцевом флюсе H_2O , мас. %	4,30
29) концентрация в известковом флюсе CaCO_3 , мас. %	84,88
30) концентрация в известковом флюсе Fe_2O_3 , мас. %	4,20
31) концентрация в известковом флюсе SiO_2 , мас. %	1,49
32) концентрация в известковом флюсе H_2O , мас. %	4,00
33) концентрация в природном газе CH_4 , об. %	92,2
34) концентрация в природном газе C_2H_6 , об. %	2,4
35) концентрация в природном газе CO_2 , об. %	1,8
36) концентрация в природном газе H_2 , об. %	0,9
37) концентрация в природном газе N_2 , об. %	2,7
38) концентрация в штейне Cu , мас. %	30,0
39) концентрация в штейне Zn , мас. %	1,20
40) концентрация в шлаке SiO_2 , мас. %	35,0
41) концентрация в шлаке CaO , мас. %	6,00
42) извлечение в пыль Zn , %	35,0
43) концентрация в техническом кислороде O_2 , об. %	90,0
44) усвоение кислорода ванной печи, %	95,0
45) массовое соотношение $\text{S}(\text{SO}_2) : \text{S}(\text{SO}_3)$ в печном газе, ед.	6,00
46) пылевывнос твердых материалов при плавке, %	3,00
47) температура медного концентрата, К	293

48) температура оборотного концентрата, К	293
49) температура клинкера, К	293
50) температура кварцевого флюса, К	293
51) температура известкового флюса, К	293
52) температура природного газа, К	300
53) температура воздуха, К	300
54) температура технического кислорода, К	310
55) температура штейно-шлаковой массы, К	1473
56) температура пыли, К	600
57) температура печного газа, К	1473

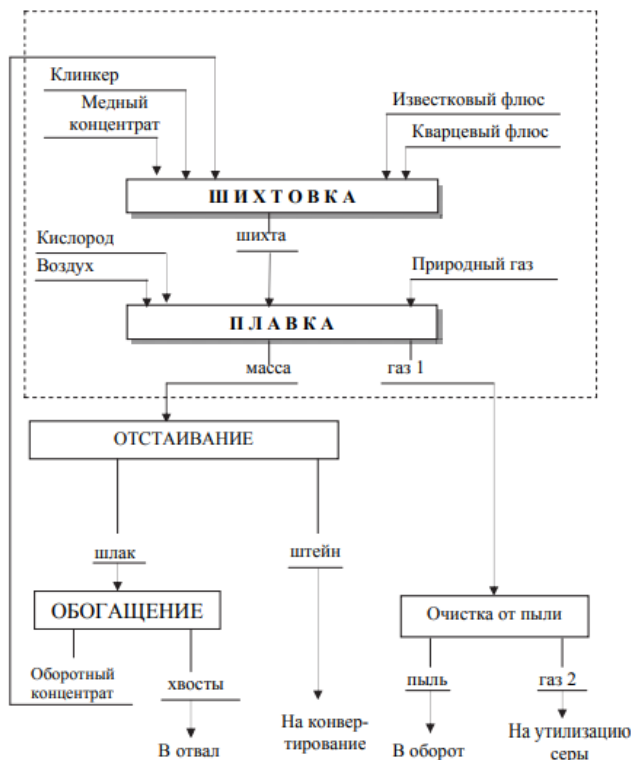


Рис. 1. Принципиальная технологическая схема выплавки штейна способом Аусмелт

МАТЕРИАЛЬНЫЙ БАЛАНС

Состав медного концентрата (табл.1). Компоненты концентрата:

CuS, CuFeS₂, FeS₂, ZnS, SiO₂, CaO.

— ZnS; расчет по Zнв нем Zn: 4,50,
в нем S: $4,50 \cdot 32,06 / 65,38 = 2,21$,
его концентрация: $4,50 + 2,21 = 6,71$;

— SiO₂; расчет по SiO₂
его концентрация: 9,60,
в нем Si: $9,60 \cdot 28,09 / (28,09 + 16,00 \cdot 2) = 4,49$,
в нем O: $9,60 - 4,49 = 5,11$;

— CaO; расчет по CaO
его концентрация: 1,15,
в нем Ca: $1,15 \cdot 40,08 / (40,08 + 16,00) = 0,82$,
в нем O: $1,15 - 0,82 = 0,33$;

— CuS; расчет по балансу S. В нем концентрация Cu принята равной x %. Уравнение баланса серы в сульфидах концентрата:

$$C_{\text{CuS}}^{\text{S}} + C_{\text{CuFeS}_2}^{\text{S}} + C_{\text{FeS}_2}^{\text{S}} + C_{\text{ZnS}}^{\text{S}} = C_{\text{конц}}^{\text{S}}$$

или

$$x \cdot \frac{A_{\text{S}}}{A_{\text{Cu}}} + (C_{\text{Cu}} - x) \cdot \frac{2A_{\text{S}}}{A_{\text{Cu}}} + \\ + \left[C_{\text{Fe}} \cdot A_{\text{Cu}} - (C_{\text{Cu}} - x) \cdot A_{\text{Fe}} \right] \cdot \frac{2A_{\text{S}}}{A_{\text{Cu}} \cdot A_{\text{Fe}}} + C_{\text{Zn}} \cdot \frac{A_{\text{S}}}{A_{\text{Zn}}} = C_{\text{конц}}^{\text{S}},$$

где C_{Cu} , C_{Fe} , C_{S} , C_{Zn} – концентрации Cu, Fe, S, Zn в медном концентрате, % (14,84; 25,76; 32,72; 4,50, соответственно); A_{Cu} , A_{Fe} , A_{S} , A_{Zn} – атомные массы Cu, Fe, S, Zn. Решение уравнения: $x = 1,86$ %.

— в нем S: $1,86 \cdot 32,06 / 63,55 = 0,94$,
его концентрация: $1,86 + 0,94 = 2,80$;

— CuFeS₂; расчет по остатку Cu
в нем Cu: $14,84 - 1,86 = 12,98$,
в нем Fe: $12,98 \cdot 55,85 / 63,55 = 11,41$,
в нем S: $12,98 \cdot 32,06 \cdot 2 / 63,55 = 13,10$,

Таблица 1

Химический и рациональный состав медного концентрата

	Элементы											Всего	
	Cu	Fe	Zn	Si	Ca	S	O	C	H	N	Проч	%	кг
Атомная масса	63,55	55,85	65,38	28,09	40,08	32,06	16,00	12,01	1,00	14,01			
Соединения	Рациональный состав, %												
CuS	1,86					0,94						2,80	2,80
CuFeS ₂	12,98	11,41				13,10						37,48	37,48
FeS ₂		14,35				16,48						30,83	30,83
ZnS			4,50			2,21						6,71	6,71
SiO ₂				4,49			5,11					9,60	9,60
CaO					0,82		0,33					1,15	1,15
H ₂ O							5,78		0,72			6,50	6,50
Прочие											4,93	4,93	4,93
Итого, %	14,84	25,76	4,50	4,49	0,82	32,72	11,22		0,72		4,93	100,00	
Итого, кг	14,84	25,76	4,50	4,49					0,72		4,93		100,00

его концентрация: $12,98+11,41+13,10=37,48$;

— FeS₂; расчет по остатку Fe

в нем Fe: $25,76-11,41=14,35$,

в нем S: $14,35 \cdot 32,06 \cdot 2 / 55,85 = 16,48$,

его концентрация: $14,35+16,48=30,83$;

— H₂O; расчет по H₂O

ее концентрация: 6,50,

в ней O: $6,50 \cdot 16,00 / (2,00 \cdot 2 + 16,00) = 5,78$,

в ней H: $6,50 - 5,78 = 0,72$;

— Прочие; расчет по разнице до 100 %

их концентрация:

$100,00 - (3,80 + 37,48 + 30,83 + 6,71 + 9,60 + 1,15 + 6,50) = 4,93$.

Состав оборотного концентрата (табл.2). Компоненты концентрата: Cu₂S, FeS, ZnS, 2FeO·SiO₂, 2CaO·SiO₂, SiO₂, CaO. Рациональный состав концентрата, %:

— Cu₂S; расчет по Cu

в нем Cu: 8,67,

в нем S: $8,67 \cdot 32,06 / (63,55 \cdot 2) = 2,19$,

его концентрация: $8,67+2,19=10,86$;

— ZnS; расчет по Zn

в нем Zn: 0,92,

в нем S: $0,92 \cdot 32,06 / 65,38 = 0,45$,

его концентрация: $0,92+0,45=1,37$;

— FeS; расчет по остатку S

в нем S: $6,60 - (3,19 + 0,45) = 3,96$,

в нем Fe: $3,96 \cdot 55,85 / 32,06 = 6,90$,

его концентрация: $3,96+6,90=10,86$;

— 2FeO·SiO₂; расчет по остатку Fe

в нем Fe: $41,22 - 6,90 = 34,32$,

в нем Si: $34,32 \cdot 28,09 / (55,85 \cdot 2) = 8,63$,

в нем O: $34,32 \cdot 16,00 \cdot 4 / (55,85 \cdot 2) = 19,66$,

его концентрация: $34,32+8,63+19,66=62,61$;

Таблица 2

Состав оборотного концентрата

	Элементы											Всего	
	Cu	Fe	Zn	Si	Ca	S	O	C	H	N	Проч.	%	кг
Атомная масса	63,55	55,85	65,38	28,09	40,08	32,06	16,00	12,01	1,00	14,01			
Соединения	Рациональный состав, %												
Cu ₂ S	8,67					2,19						10,86	3,26
FeS		6,90				3,96						10,86	3,26
ZnS			0,92			0,45						1,37	0,41
2FeO·SiO ₂		34,32		8,63			19,66					62,61	18,78
2CaO·SiO ₂				0,28	0,80		0,64					1,72	0,52
SiO ₂				0,87			0,99					1,86	0,56
H ₂ O							4,93		0,62			5,55	1,67
Прочие											5,17	5,17	1,55
Итого, %	8,67	41,22	0,92	9,78	0,80	6,60	26,23	0,00	0,62	0,00	5,17	100,00	
Итого, кг	2,60	12,37	0,28	2,93	0,24	1,98	7,87	0,00	0,19	0,00	1,55		30,00

$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$; расчет по Ca

в нем Ca: $1,12\cdot 40,08/(40,08+16,0)=0,80$,

в нем Si: $0,80\cdot 28,09/(40,08\cdot 2)=0,28$,

в нем O: $0,80\cdot 16,00\cdot 4/(40,08\cdot 2)=0,64$,

его концентрация: $0,28+0,80+0,64=1,72$;

— SiO_2 ; расчет по остатку Si

всего Si: $20,92\cdot 28,09/(28,09+16,00\cdot 2)=9,78$,

в нем Si: $9,78-(8,63+0,28)=0,87$,

в нем O: $0,87\cdot 16,00\cdot 2/28,09=0,99$,

его концентрация: $0,87+0,99=1,86$;

— H_2O ; расчет по H_2O

ее концентрация: 5,55,

в ней O: $5,55\cdot 16,00/(2,00\cdot 2+16,00)=4,93$,

в ней H: $5,55-4,93=0,62$;

— Прочие; расчет по разнице до 100 %

их концентрация:

$100,00-(10,86+10,86+1,37+62,61+1,72+1,86+5,55)=5,17$.

Масса концентрата, кг:

$100,00\cdot 30,00/100,00=30,00$,

где 30,00 – заданный расход оборотного концентрата от медного концентрата, %.

Состав клинкера (табл.3). Компоненты клинкера: Cu_2S , Fe, FeS, FeO, $2\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$, ZnS, $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, C. Рациональный состав клинкера, %:

— Cu_2S ; расчет по Cu

в нем Cu: 4,36,

в нем S: $4,36\cdot 32,06/(63,55\cdot 2)=1,10$,

его концентрация: $4,36+1,10=5,46$;

— Fe; расчет по доле $\text{Fe}_{\text{мет}}$ от $\text{Fe}_{\text{общ}}$

в нем Fe: $36,80\cdot 0,32=11,78$;

— ZnS; расчет по Zn

в нем Zn: 2,50

в нем S: $2,50 \cdot 32,06 / 65,38 = 1,23$,
 его концентрация: $2,50 + 1,23 = 3,73$;
 — FeS; расчет по остатку S
 в нем S: $4,70 - (2,23 + 1,10) = 2,37$,
 в нем Fe: $2,37 \cdot 55,85 / 32,06 = 4,14$,
 его концентрация: $2,37 + 4,14 = 6,51$;
 — $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$; расчет по Ca
 в нем Ca: $4,80 \cdot 40,08 / (40,08 + 16,00) = 3,43$,
 в нем Si: $3,43 \cdot 28,09 / (40,08 \cdot 2) = 1,20$,
 в нем O: $3,43 \cdot 16,00 \cdot 4 / (40,08 \cdot 2) = 5,48$,
 его концентрация: $1,20 + 3,43 + 5,48 = 10,11$;
 — $2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$; расчет по остатку Si
 всего Si: $12,20 \cdot 28,09 / (28,09 + 16,00 \cdot 2) = 5,70$,
 в нем Si: $5,70 - 1,20 = 4,50$,
 в нем Fe: $4,50 \cdot 55,85 \cdot 2 / 28,09 = 17,90$,
 в нем O: $4,50 \cdot 16,00 \cdot 4 / 28,09 = 10,25$,
 всего концентрация: $17,90 + 4,50 + 10,25 = 32,65$;
 — FeO; расчет по остатку Fe
 в нем Fe: $36,80 - (11,78 + 4,14 + 17,90) = 2,99$,
 в нем O: $2,99 \cdot 16,00 / 55,85 = 0,86$,
 всего концентрация: $2,99 + 0,86 = 3,85$;
 — C; расчет по C
 всего концентрация: 12,00,
 — H_2O ; расчет по H_2O
 ее концентрация: 11,30,
 в ней O: $11,30 \cdot 16,00 / (2,00 \cdot 2 + 16,00) = 10,04$,
 в ней H: $11,30 - 10,04 = 1,26$;
 — Прочие; расчет по разнице до 100 %
 их концентрация:
 $100,00 - (6,46 + 11,78 + 6,51 + 3,85 + 32,06 + 3,73 + 10,11 + 12,00 + 11,3) = 2,62$.
 Масса клинкера, кг:
 $100,00 \cdot 10,00 / 100,00 = 10,00$,
 где 10,00 – заданный расход клинкера от медного концентрата, %.

Состав штейна (табл.4). Компоненты штейна: Cu_2S , FeS , ZnS , Fe_3O_4 , Рациональный состав штейна, %:

— Cu_2S ; расчет по Cu

в нем Cu : 30,0,

в нем S : $30,0 \cdot 32,06 / (63,55 \cdot 2) = 7,57$,

его концентрация: $30,00 + 7,57 = 37,57$;

— Fe_3O_4 . Концентрация в штейне оксида железа $[\text{Fe}_3\text{O}_4]$, %, определена по эмпирическому уравнению в зависимости от концентрации меди в штейне $[\text{Cu}]$, %:

$[\text{Fe}_3\text{O}_4] = 0,0005 [\text{Cu}]^2 - 0,4612 [\text{Cu}] + 25,37$,

$[\text{Fe}_3\text{O}_4] = 0,0005 \cdot 30,0^2 - 0,4612 \cdot 30,0 + 25,37 = 11,98$,

в нем Fe : $11,98 \cdot 55,85 \cdot 3 / (55,85 \cdot 3 + 16,00 \cdot 4) = 8,67$,

в нем O : $11,98 - 8,67 = 3,31$;

— ZnS ; расчет по Zn

в нем Zn : 1,20,

в нем S : $1,20 \cdot 32,06 / 65,38 = 0,59$,

его концентрация: $1,20 + 0,59 = 1,79$;

— FeS ; расчет по остатку S . Концентрация в штейне серы $[\text{S}]$, %, определена по эмпирическому уравнению в зависимости от концентрации меди в штейне $[\text{Cu}]$, %:

$[\text{S}] = -0,05 [\text{Cu}] + 26,30$,

$[\text{S}] = -0,05 \cdot 30,0 + 26,30 = 24,80$,

в нем S : $24,80 - (7,57 + 0,59) = 16,64$,

в нем Fe : $16,64 \cdot 55,85 / 32,06 = 29,00$,

его концентрация: $16,64 + 29,00 = 45,64$;

Прочие; расчет по разнице до 100 %

$100 - (37,57 + 45,64 + 1,79 + 11,98) = 3,02$.

Масса штейна определена из условия перевода всей поступившей на плавку меди (с медным концентратом, обратным концентратом и клинкером) в штейн с концентрацией в нем меди 30,00 %, с учетом пылевыноса при плавке:

Таблица 4

Химический и рациональный состав штейна

	Элементы										Всего		
	Cu	Fe	Zn	Si	Ca	S	O	C	H	N	Проч.	%	кг
Атомная масса	63,55	55,85	65,38	28,09	40,08	32,06	16,00	12,01	1,00	14,01			
Соединения													
	30,00					7,57						37,57	21,71
Cu ₂ S		29,00				16,64						45,64	26,38
FeS			1,20			0,59						1,79	1,03
ZnS		8,67				3,31						11,98	6,93
Fe ₂ O ₄											3,02	3,02	1,75
Прочно											3,02	3,02	100,00
Итого, %	30,00	37,67	1,20			24,80	3,31				3,02	100,00	
Итого, кг	17,34	21,77	0,69			14,33	1,91				1,75		57,80
Cu ₂ S	30,00					7,57						37,57	21,71
FeS		29,00				16,64						45,64	26,38
ZnS			1,20			0,59						1,79	1,03

масса поступившей меди, кг: $14,84 + 2,60 + 0,44 = 17,88$;
 коэффициент учета пылевыноса $(100,00 - 3,00) / 100,00 = 0,9700$, где 3,00 – заданное значение пылевыноса, %;
 – масса штейна, кг: $17,88 \cdot 0,9700 \cdot 100 / 30,00 = 57,80$.

Предварительный состав шлака (без добавки флюсов, табл.5) рассчитан как результат материального баланса плавки по основным элементам – Fe, Zn, Si, Ca, перешедшим в шлак. При расчете для всех элементов, кроме цинка, учтен пылевынос загружаемых в печь твердых материалов (3,0 % от их массы), кг, например:

– Fe: $(25,76 + 12,37 + 3,68) \cdot 3,0 / 100,00 = 1,25$ и т.д.

Количество цинка в пыли, кг, рассчитано по заданному извлечению его в пыль (35,0 %), которое учитывает возгонку сульфида цинка: – Zn: $(4,50 + 0,28 + 0,25) \cdot 35,00 / 100,00 = 1,76$.

Масса основных элементов в шлаке (Fe, Zn, Si, Ca) определена по разности между их приходом с концентратами и клинкером и расхода с пылью и штейном. Рациональный состав шлака, кг:

– FeO; расчет по Fe

в нем Fe: $(25,76 + 12,37 + 3,68) - (1,25 + 21,77) = 18,78$,

в нем O: $18,78 \cdot 16,00 / 55,85 = 5,38$,

его масса: $18,78 + 5,38 = 24,16$;

– ZnO; расчет по Zn

в нем Zn: $(4,50 + 0,28 + 0,25) - (1,76 + 0,69) = 2,57$,

в нем O: $2,57 \cdot 16,00 / 65,38 = 0,63$,

его масса: $2,57 + 0,63 = 3,20$;

– SiO₂; расчет по Si

в нем Si: $(4,49 + 2,93 + 0,57) - 0,24 = 7,75$,

в нем O: $7,75 \cdot 16,00 \cdot 2 / 28,09 = 8,83$,

его масса: $7,75 + 8,83 = 16,58$;

– CaO; расчет по Ca

в нем Ca: $(0,82 + 0,24 + 0,34) - 0,04 = 1,36$,

в нем O: $1,36 \cdot 16,00 / 40,08 = 0,54$,

Таблица 5

Химический и рациональный состав шлака

	Элементы											Всего	
	Сu	Fe	Zn	Si	Ca	S	O	C	H	N	Проч.	%	кг
Атомная масса	63,55	55,85	65,38	28,09	40,08	32,06	16,00	12,01	1,00	14,01			
	ПОСТУПИЛО, кг												
Сu концентрат	14,84	25,76	4,50	4,49	0,82	32,72	11,22	0,00	0,72	0,00	4,93	100,00	
Об. концентрат	2,60	12,37	0,28	2,93	0,24	1,98	7,87	0,00	0,19	0,00	1,55	30,00	
Клинкер	0,44	3,68	0,25	0,57	0,34	0,47	2,66	1,20	0,13	0,00	0,26	10,00	
Всего, кг	17,88	41,81	5,03	7,99	1,41	35,17	21,75	1,20	1,03	0,00	6,74	140,00	
	ПОЛУЧЕНО, кг												
Пыль	0,54	1,25	1,76	0,24	0,04	1,06	0,65	0,04	0,03	0,00	0,20	5,81	
Штета	17,34	21,77	0,69	0,00	0,00	14,33	1,91	0,00	0,00	0,00	1,75	57,80	
В шлаке	18,78	2,57	2,57	7,75	1,36						4,79		
Соединения	Рациональный состав шлака, кг												
FeO	18,78						5,36					24,16	47,70
ZnO			2,57				0,63					3,20	6,32
SiO ₂				7,75			8,83					16,58	32,74
CaO					1,36		0,54					1,91	3,77
Прочие											4,79	4,79	9,47
Итого, кг	18,78	2,57	2,57	7,75	1,36		15,38				4,79	50,63	
Итого, %	37,08	5,08	5,08	15,31	2,69		30,38				9,47	100,00	

его масса: $1,36+0,54=1,91$;

— Прочие

их масса: $(4,93+1,55+0,26) - (0,20+1,75) = 4,79$.

Масса шлака составила 50,65 кг. В полученном шлаке концентрации, %:

— SiO_2 : $16,58 \cdot 100,00/50,65 = 32,74$,

— CaO : $1,91 \cdot 100,00/50,65 = 3,77$

меньше заданных (35,0 % и 6,0 %, соответственно), что требует включить в состав шихты кварцевый и известковый флюсы.

Состав кварцевого флюса (табл. 6). Компоненты флюса: FeS_2 , CaCO_3 , $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, SiO_2 . Рациональный состав флюса, %:

— FeS_2 ; расчет по S

в нем S: 0,30,

в нем Fe: $0,30 \cdot 55,85/(32,06 \cdot 2) = 0,26$,

его концентрация: $0,30+0,26 = 0,56$;

— $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$; расчет по остатку Fe

в нем Fe: $6,50 - 0,26 = 6,24$,

в нем O: $6,24 \cdot 16,00 \cdot 6/(55,85 \cdot 2) = 5,36$,

в нем H: $6,24 \cdot 1,00 \cdot 6/(55,85 \cdot 2) = 0,34$,

его концентрация: $6,24+5,36+0,34 = 11,94$;

— CaCO_3 ; расчет по CaO

в нем Ca: $7,00 \cdot 40,08/(40,08+16,00) = 5,00$,

в нем O: $5,00 \cdot 16,00 \cdot 3/40,08 = 5,99$,

в нем C: $5,00 \cdot 12,01/40,08 = 1,50$,

его концентрация: $5,00+5,99+1,50 = 12,49$;

— SiO_2 ; расчет по SiO_2

в нем Si: $67,30 \cdot 28,09/(28,09+16,00 \cdot 2) = 31,46$,

в нем O: $31,46 \cdot 16,00 \cdot 2/28,09 = 35,84$;

— H_2O ; расчет по H_2O

в нем O: $4,30 \cdot 16,00/(16,00+1,00 \cdot 2) = 3,82$,

в нем H: $4,30 - 3,82 = 0,48$;

Таблица 6

Химический и рациональный состав кварцевого флюса

Соединения	Элементы													Всего	
	Cu	Fe	Zn	Si	Ca	S	O	C	H	N	Проч.				
	63,55	55,85	65,38	28,09	40,08	32,06	16,00	12,01	1,00	14,01		%	кг		
Рациональный состав, %															
FeS ₂		0,26				0,30							0,56	0,03	
Fe ₂ O ₃ ·3H ₂ O		6,24					5,36		0,34				11,94	0,55	
CaCO ₃					5,00		5,99	1,50					12,49	0,57	
SiO ₂				31,46			35,84						67,30	3,08	
H ₂ O									0,48				4,30	0,20	
Прочие											3,41		3,41	0,16	
Итого, %		6,50		31,46	5,00	0,30	51,02	1,50	0,81		3,41		100,00		
Итого, кг		0,30		1,44	0,23	0,01	2,34	0,07	0,04		0,16			4,58	
FeS ₂		0,26				0,30							0,56	0,03	
Fe ₂ O ₃ ·3H ₂ O		6,24					5,36		0,34				11,94	0,55	

Прочие; расчет по разности до 100 %

$$100,00 - (0,56 + 1,94 + 12,49 + 67,30 + 4,30) = 3,41.$$

Количество кварцевого флюса, необходимое для образования шлака, рассчитано ниже.

Состав известкового флюса (табл.7). Компоненты флюса: $\text{CaCO}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3, \text{SiO}_2$. Рациональный состав флюса, %:

– CaCO_3 ; расчет по CaCO_3

его концентрация: 84,88;

$$\text{в нем Ca: } 84,88 \cdot 40,08 / (40,08 + 12,01 + 16,00 \cdot 3) = 33,99,$$

$$\text{в нем C: } 33,99 \cdot 12,01 / 40,08 = 10,18,$$

$$\text{в нем O: } 33,99 \cdot 16,00 \cdot 3 / 40,08 = 40,71;$$

– Fe_2O_3 ; расчет по Fe_2O_3

его концентрация: 4,20,

$$\text{в нем Fe: } 4,20 \cdot 55,85 \cdot 2 / (55,85 \cdot 2 + 16,00 \cdot 3) = 2,94,$$

$$\text{в нем O: } 4,20 - 2,94 = 1,26;$$

– SiO_2 ; расчет по SiO_2

его концентрация: 1,49,

$$\text{в нем Si: } 1,49 \cdot 28,09 / (28,09 + 16,00 \cdot 2) = 0,70,$$

$$\text{в нем O: } 1,49 - 0,70 = 0,79;$$

– H_2O ; расчет по H_2O

$$\text{в нем O: } 4,00 \cdot 16,00 / (16,00 + 1,00 \cdot 2) = 3,56,$$

$$\text{в нем H: } 4,00 - 3,56 = 0,44;$$

– Прочие; расчет по разности до 100 %

$$100,00 - (84,88 + 4,20 + 1,49 + 4,00) = 5,43.$$

Количество известкового флюса, необходимое для образования шлака, рассчитано ниже.

Количество и состав шлака (табл. 8). Без учета пылевыноса массы кварцевого флюса, (x , кг) и известкового флюса (y , кг) определены решением системы двух уравнений, выражающих материальные балансы плавки:

– по SiO_2 :

Таблица 7

Химический и рациональный состав известкового флюса

	Элементы											Всего		
	Cu	Fe	Zn	Si	Ca	S	O	C	H	N	Проч.	%	кг	
Атомная масса	63,55	55,85	65,38	28,09	40,08	32,06	16,00	12,01	1,00	14,01				
Соединения							Рациональный состав, %							
CaCO ₃					33,99		40,71	10,18				84,88	2,10	
Fe ₂ O ₃		2,94					1,26					4,20	0,10	
SiO ₂				0,70			0,79					1,49	0,04	
H ₂ O							3,56		0,44			4,00	0,10	
Прочие											5,43	5,43	0,13	
Всего, %		2,94		0,70	33,99		46,32	10,18	0,44		5,43	100,00		
Всего, кг		0,07		0,02	0,84		1,15	0,25	0,01		0,13		2,48	

$$\frac{G^{\text{шл1}} C_{\text{SiO}_2}^{\text{шл1}} + x C_{\text{SiO}_2}^{\text{кф}} + y C_{\text{SiO}_2}^{\text{иф}}}{G^{\text{шл1}} + x K^{\text{кф}} + y K^{\text{иф}}} = C_{\text{SiO}_2}^{\text{шл2}},$$

– по CaO

$$\frac{G^{\text{шл1}} C_{\text{CaO}}^{\text{шл1}} + x C_{\text{CaO}}^{\text{кф}} + y C_{\text{CaO}}^{\text{иф}}}{G^{\text{шл1}} + x K^{\text{кф}} + y K^{\text{иф}}} = C_{\text{CaO}}^{\text{шл2}},$$

где $G^{\text{шл1}}$ – масса шлака без добавки флюсов, кг (50,65); $C_{\text{SiO}_2}^{\text{шл1}}, C_{\text{SiO}_2}^{\text{шл2}}$ – концентрация SiO_2 в шлаке, %, без добавки флюсов (32,74) и после добавки флюсов (заданная, 35,00); $C_{\text{CaO}}^{\text{шл1}}, C_{\text{CaO}}^{\text{шл2}}$ – концентрация CaO в шлаке, %, без добавки флюсов (3,77) и после добавки флюсов (заданная, 6,00); $C_{\text{SiO}_2}^{\text{кф}}, C_{\text{SiO}_2}^{\text{иф}}$ – концентрация SiO_2 , %, в кварцевом флюсе (67,30) и в известковом флюсе (1,49); $C_{\text{CaO}}^{\text{кф}}, C_{\text{CaO}}^{\text{иф}}$ – концентрация CaO, %, в кварцевом флюсе (7,00) и в известковом флюсе:

$$C_{\text{CaO}}^{\text{иф}} = 84,88 \cdot (40,08 + 16,00) / (40,08 + 12,01 + 16,00 \cdot 3) = 47,56;$$

$K^{\text{кф}}$ – коэффициент кварцевого флюса, учитывающий испарение воды, удаление H_2O из $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ и CO_2 из CaCO_3 при плавке, ед.:

$$K^{\text{кф}} = [100,00 - 0,81 \cdot (16,00 + 1,00 \cdot 2) / (2,00 \cdot 2) - 1,50 \cdot (12,01 + 16,00 \cdot 2) / 12,01] / 100,00 = 0,872,$$

где 0,81, 1,50 – концентрации в кварцевом флюсе водорода и углерода, %; $K^{\text{иф}}$ – коэффициент известкового флюса, учитывающий испарение воды и разложение CaCO_3 при плавке, ед.:

$$K^{\text{иф}} = [100,00 - 0,44 \cdot (16,00 + 1,00 \cdot 2) / (2,00 \cdot 2) - 0,18 \cdot (12,01 + 16,00 \cdot 2) / 12,01] / 100,00 = 0,627,$$

где 0,44; 0,18 – концентрация в известковом флюсе водорода и углерода, %. Решения системы: $x = 4,45$ кг, $y = 2,41$ кг.

С учетом пылевыноса фактическое количество флюсов, кг:

– кварцевый флюс: $4,45 \cdot 100 (100 - 3) = 4,58$,

– известковый флюс: $2,40 \cdot 100 (100 - 3) = 2,48$.

По этим значениям в табл. 6 и 7 рассчитаны рациональный и химический составы флюсов, кг.

Состав и масса шлака с добавкой флюсов (см. табл.8) рассчитаны аналогично расчету шлака без флюсов (см. табл.5).

Химический и рациональный состав шлака с добавкой флюсов

Атомная масса	Элементы											Всего	
	Cu	Fe	Zn	Si	Sa	S	O	C	H	N	Проч.	%	кг
	П О С Т У П И Д О, кг												
Сu концентрат	14,84	25,76	4,50	4,49	0,82	32,72	11,22	0,00	0,72			4,93	100,00
Об, конц-град	2,60	12,37	0,28	2,93	0,24	1,98	7,87	0,00	0,19			1,55	30,00
Клинкер	0,44	3,68	0,25	0,57	0,34	0,47	2,66	1,20	0,13			0,26	10,00
Кварц, флюс		0,30		1,44	0,23	0,01	2,34	0,07	0,04			0,16	4,58
Извест. флюс		0,07		0,02	0,84		1,15	0,25	0,01			0,13	2,48
Всего, кг	17,88	42,18	5,03	9,45	2,48	35,18	25,23	1,52	1,08			7,03	147,06
	Всего, кг												
Пыль	0,54	1,27	1,76	0,28	0,07	1,06	0,76	0,05	0,03			0,21	6,02
Штейн	17,34	21,77	0,69	0,00	0,00	14,33	1,91					1,75	57,80
В шлаке		19,14	2,57	9,17	2,40							5,08	
Всего, кг	17,88	42,18	5,03	9,45	2,48							7,03	
Соединения	Рациональный состав шлака, кг												
2FeO·SiO ₂		19,14		4,81			10,97						34,92
ZnO			2,57				0,63						3,20
2CaO·SiO ₂				0,84	2,40		1,92						5,16
SiO ₂				3,51			4,00						7,51
Прочие												5,08	5,08
Итого, кг	0,00	19,14	2,57	9,17	2,40	0,00	17,51	0,00	0,00	0,00		5,08	55,87
Итого, %	0,00	34,25	4,61	16,41	4,30	0,00	31,35					9,08	100,00

Масса шлака составила 55,87 кг. В полученном шлаке концентрации, %:

$$- \text{SiO}_2: 9,17 \cdot (28,09 + 16,00 \cdot 2) \cdot 100 / (28,09 \cdot 55,87) = 35,10,$$

$$- \text{CaO}: 2,40 \cdot (40,08 + 16,00) \cdot 100 / (40,08 \cdot 55,87) = 6,02$$

удовлетворяют заданным (35,00 % и 6,00 %, соответственно).

Состав и количество штейно-шлаковой массы (табл.9) получены суммированием данных табл. 2.4 и 2.8.

Количество и состав газов (табл.10). Количество подаваемого воздуха задано и для печи данных размеров не должно превышать 1200 м³/ч на 1 т медного концентрата во избежание чрезмерного разбрызгивания расплавленной массы.

Объем воздуха, приходящийся на 1 т медного конц-та, м³:

$$900 \cdot 100 / 1000 = 90,00 ,$$

$$\text{в нем O}_2, \text{ м}^3: 90,00 \cdot 21,00 / 100 = 18,90 ,$$

$$\text{в нем O}_2, \text{ кг}: 18,90 \cdot 16,00 \cdot 2 / 22,4 = 27,00 ,$$

где 21,0 – концентрация O₂ в воздухе, об. %, 22,4 – объем 1 кг-моля газа, м³. Данные для азота воздуха рассчитаны аналогично.

Объем природного газа на 1 т медного концентрата, м³:

$$55,0 \cdot 100 / 1000 = 5,50 ,$$

$$\text{в нем CH}_4, \text{ м}^3: 5,50 \cdot 92,2 / 100 = 5,07 ,$$

$$\text{в нем CH}_4, \text{ кг}: 5,07 \cdot (12,01 + 1,00 \cdot 4) / 22,4 = 3,62 .$$

Остальные компоненты природного газа рассчитаны аналогично.

Состав отходящего газа рассчитан по балансу элементов – S, C, H, N, поступивших на плавку (шихта и природный газ) и полученных в результате плавки (пыль и масса), кг:

$$\text{Перешло S в газ, кг}: 35,18 - (1,06 + 14,33) = 19,79,$$

– SO₂: расчет по массе S и ее распределению между SO₂ и SO₃

$$\text{в нем S}: 19,79 \cdot 6 / (6 + 1) = 16,97,$$

$$\text{в O}: 16,97 \cdot 16,00 \cdot 2 / (32,06 + 16,00 \cdot 2) = 16,93,$$

$$\text{его масса}: 16,97 + 16,93 = 33,90;$$

– SO₃; расчет по остатку S

$$\text{в нем S}: 19,79 - 16,97 = 2,83,$$

$$\text{в O}: 2,83 \cdot 16,00 \cdot 3 / (32,06 + 16,00 \cdot 3) = 4,23,$$

Таблица 9

Химический и рациональный состав штейно-шлаковой массы

Атомная масса Соединения	Элементы											Всего	
	Cu	Fe	Zn	Si	Ca	S	O	C	H	N	Проч.	%	кг
	63,55	55,85	65,38	28,09	40,08	32,06	16,00	12,01	1,00	14,01	Проч.		
Рациональный состав, %													
Cu ₂ S	17,34					4,37						21,71	19,10
FeS		16,76				9,62						26,38	23,21
ZnS			0,69			0,34						1,03	0,91
Fe ₃ O ₄		5,01					1,91					6,93	6,09
2FeO·SiO ₂		19,14		4,81			10,97					34,92	30,72
ZnO			2,57				0,63					3,20	2,82
SiO ₂				3,51			4,00					7,51	6,61
2CaO·SiO ₂				0,84	2,40		1,92					5,16	4,54
Прочие											6,82	6,82	6,00
Итого, кг	17,34	40,91	3,27	9,17	2,40	14,33	19,43	0,00	0,00	0,00	6,82	113,68	
Итого, %	15,25	35,99	2,87	8,06	2,11	12,61	17,09				6,00		100,00

Таблица 10

Расчет количества и состава газов

Атомная масса	Элементы					Всего		Всего	
	S	O	C	H	N	кг	мас. %	м ³	об. %
	32,06	16,00	12,01	1,00	14,01				
П О С Т У П И Л О, кг									
Шихта, в ней									
Медный концентрат	32,72	11,22		0,72					
оборотный концентрат	1,98	7,87		0,19					
клинкер	0,47	2,66	1,20	0,13					
кварцевый флюс	0,01	2,34	0,07	0,04					
известковый флюс		1,15	0,25	0,01					
Итого шихта	35,18	25,23	1,52	1,08	0,00	63,02			
Природный газ, в нем									
CH ₄			2,72	0,91		3,62	86,58	5,07	92,20
C ₂ H ₆			0,14	0,04		0,18	4,23	0,13	2,40
CO ₂		0,14	0,05			0,19	4,65	0,10	1,80
H ₂				0,00		0,00	0,11	0,05	0,90
N ₂					0,19	0,19	4,44	0,15	2,70
Итого:	0,00	0,14	2,91	0,95	0,19	4,19	100,00	5,50	100,00
Воздух, в нем									
O ₂		27,00				27,00	23,29	18,90	21,00
N ₂					88,94	88,94	76,71	71,10	79,00
Итого:		27,00			88,94	115,94	100,00	90,00	100,00
Всего, кг	35,18	52,38	4,43	2,03	89,12	183,15			
П О Л У Ч Е Н О, кг									
Продукты плавки, в них									
пыль	1,06	0,76	0,05	0,03	0,00				
масса	14,33	19,43	0,00	0,00	0,00				
Перешло в газ	19,79		4,39	1,99	89,12				
Отходящий газ, в нем									
SO ₂	16,97	16,93				33,90	20,34	11,85	10,13
SO ₃	2,83	4,23				7,06	4,24	1,98	1,69
H ₂ O		15,95		1,99		17,94	10,77	22,33	19,08
CO ₂		11,69	4,39			16,08	9,65	8,19	6,99
N ₂					90,83	90,83	54,49	72,61	62,03
O ₂		0,87				0,87	0,52	0,09	0,08
Итого, кг	19,79	49,69	4,39	1,99	90,83	166,69	100,00	117,05	100,00
Всего, кг	35,18	69,87	4,43	2,03	90,83				
Техн. O ₂ , в нем									
N ₂					1,70	1,70	8,87	1,36	10,00
O ₂		17,50				17,50	91,13	12,25	90,00
Итого		17,50			1,70	19,20	100,00	13,61	100,00

его масса: $2,83 + 4,23 = 7,06$;

– H₂O: расчет по массе Н
 нем Н: $1,08 + 0,95 - 0,03 = 1,99$,
 нем О: $1,99 \cdot 16,00 / (1,00 \cdot 2) = 15,95$,
 масса: $1,99 + 15,95 = 17,94$;

– CO₂: расчет по массе С
 в нем С: $1,52 + 2,91 - 0,05 = 4,39$,
 в О: $4,39 \cdot 16,00 \cdot 2 / 12,01 = 11,69$,
 его масса: $4,39 + 11,69 = 16,08$;

– O₂: расчет по усвоению O₂ ванной печи
 количество кислорода в газе в виде соединений (SO₂, SO₃,
 H₂O, CO₂), кг: $16,93 + 4,23 + 15,95 + 11,69 = 48,81$,
 теоретический расход кислорода, кг:
 $(0,76 + 19,43 + 48,81) - (25,23 + 0,14 + 27,0) = 16,63$,
 практический расход кислорода, кг:
 $16,63 \cdot 100,0 / 95,0 = 17,50$,
 где 95,0 – заданное усвоение кислорода ванной печи, %;
 количество кислорода в отходящем газе, кг:
 $17,50 - 16,63 = 0,87$;

– N₂: азот переходит в состав отходящего газа из природного
 газа (0,19 кг), воздуха (88,94) и технического кислорода. Количество
 азота в техническом кислороде:
 $17,50 \cdot 22,4 \cdot (100,0 - 90,0) / (16,00 \cdot 2 \cdot 90,0) = 1,36 \text{ м}^3$
 или $1,36 \cdot 14,01 \cdot 2 / 22,4 = 1,70 \text{ кг}$,
 где 90,0 – заданная концентрация кислорода в техническом
 кислороде, об. %.

Количество азота в отходящем газе, кг:
 $0,19 + 88,94 + 1,70 = 90,83$.

Состав отходящего газа, м³:
 – SO₂: $33,90 \cdot 22,4 / (32,06 + 16,00 \cdot 2) = 11,85$.

Объем остальных компонентов газа рассчитан аналогично.

Материальный баланс плавки (табл.11). Поэлементное равенство поступивших и полученных масс элементов свидетельствует от правильности металлургического расчета.

ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС

Тепловой баланс рассчитан по результатам расчета материального баланса. Длительность переработки 100,00 кг медного концентрата при заданной производительности печи по медному концентрату (40,00 т/ч), ч:

$$\tau = 100,00 \cdot 0,001/40,00 = 0,0025$$

Количества тепла Q_i , содержащегося в материалах плавки, рассчитаны по уравнению:

$$Q_i = 0,01(T_i - 273) \sum G_i b_i H_i,$$

где G_i – масса i -го компонента материала, кг; H_i – удельная теплоемкость i -го компонента материала, кДж/(кг·град), при температуре T_i , К, рассчитанная по уравнению:

$$H_i = A \cdot 10^{-8} T^2 + B \cdot 10^{-4} T + C.$$

Для упрощения расчетов теплоемкость холодных материалов принята равной 1,0, а при расчете Q_i учтены лишь компоненты материалов, концентрация которых превышает 1 %.

Приход тепла, МДж:

а) тепло Си концентрата Q_1 при температуре 293 К:

$$Q_1 = 100,00 \cdot 1,0 \cdot (293 - 273)/1000 = 2,00,$$

где 1,0 – принятая теплоемкость холодных твердых материалов, Дж/(г·град);

б) тепло оборотного концентрата Q_2 при температуре 293 К:

$$Q_2 = 30,00 \cdot 1,0 \cdot (293 - 273)/1000 = 0,60;$$

в) тепло клинкера Q_3 при температуре 293 К:

$$Q_3 = 10,00 \cdot 1,0 \cdot (293 - 273)/1000 = 0,20;$$

г) тепло кварцевого флюса Q_4 при температуре 293 К:

$$Q_4 = 4,57 \cdot 1,0 \cdot (293 - 273)/1000 = 0,09;$$

д) тепло известкового флюса Q_5 при температуре 293 К:

$$Q_5 = 2,48 \cdot 1,0 \cdot (293 - 273)/1000 = 0,05;$$

е) тепло природного газа Q_6 при температуре 300 К:

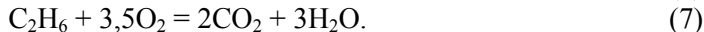
$$Q_6 = 4,19 \cdot 2,0 \cdot (300 - 273)/1000 = 0,23;$$

где 2,0 – средняя теплоемкость природного газа, Дж/(г·град);
 ж) тепло технического кислорода Q_7 при температуре 310 К:
 $Q_7 = 19,20 \cdot 1,0 \cdot (310 - 273)/1000 = 0,67$;
 где 1,0 – средняя теплоемкость технического кислорода,
 Дж/(г·град); з) тепло воздуха Q_8 при температуре 300 К:
 $Q_8 = 115,94 \cdot 1,0 \cdot (300 - 273)/1000 = 3,17$; где 1,0 – средняя
 теплоемкость воздуха, Дж/(г·град);
 и) тепловые эффекты экзореакций Q_9 при температуре 1473
 К: 485,01 (табл.12) рассчитаны по уравнению:

$$Q_{ij} = G_{pk} H_i / M_{pk}$$

где G_{pk} – изменение массы расчетного компонента (ПК) реакции в
 результате плавки, кг; H_i – изменение энтальпии реакции при
 заданной температуре, кДж/моль; M_{pk} – молярная масса ПК, кг/моль.

Реакции, дающие основной тепловой эффект при плавке:



По реакции (1) количество ПК (FeS, молярная масса 87,91),
 кг:

– поступило:

а) с медным концентратом:

$$(11,41 + 14,35) \cdot 100,00 \cdot 87,91 \cdot (55,85 \cdot 100) = 40,55;$$

где 11,41, 14,35 – концентрация Fe в виде CuFeS_2 и FeS_2 , %; 100,00 –
 масса Cu концентрата, кг (см. табл.1);

б) с оборотным концентратом: 3,26 (см. табл.2);

в) с клинкером: 0,65 (см. см. табл.3);

г) с кварцевым флюсом:

$$0,03 \cdot (55,85 + 32,06) / (55,85 + 32,06 \cdot 2) = 0,02,$$

где 0,03 – масса FeS_2 , кг (см. табл.6).

Расчет тепловых эффектов реакций плавки (1473 К)

ПОКАЗАТЕЛЬ	Реакция												
	экзотермическая						эндотермическая						
	2.20	2.21	2.22	2.23	2.24	2.25	2.26	2.27	2.28	2.29	2.30		
Расчетный компонент (РК)	FeS	S ₂	ZnS	Fe	C	CH ₄	C ₂ H ₆	Fe ₂ SiO ₄	FeS ₂	2CuFeS ₂	CaCO ₃		
Молярная масса РК	87,91	64,12	97,44	55,85	12,01	16,01	30,02	203,79	119,97	367,04	100,09		
Поступило РК, кг													
медный концентрат	40,55	11,51	6,71						30,83	37,48			
оборотный концентрат	3,26		0,41					18,78					
клинкер	0,65		0,37	1,18	1,20			3,27					
кварцевый флюс	0,02								0,03			0,57	
известковый флюс												2,10	
природный газ						3,62	0,18						
Итого поступило	44,48	11,51	7,49	1,18	1,20	3,62	0,18	22,05	30,86	37,48	2,68		
Получено РК, кг													
пыль	1,33	0,35	0,22	0,04	0,04		0,01	0,66	0,93	1,12	0,08		
масса	26,38		1,03					34,92					
газ													
Итого получено	27,71	0,35	1,26	0,04	0,04	0,00	0,01	35,58	0,93	1,12	0,08		
Прореагировало, кг	16,76	11,17	6,23	1,14	1,16	3,62	0,17	-13,53	29,93	36,36	2,60		
моль	0,1907	0,1742	0,0640	0,0205	0,0969	0,2264	0,0057	-0,0664	0,2495	0,0991	0,0259		
Тепловой эффект реакции ΔН, МДж/моль	-502,82	-720,96	-461,11	-263,96	-395,51	-804,60	-1433,89	-38,48	173,35	155,49	160,29		
Количество тепла, МДж	95,87	125,57	29,49	5,40	38,33	182,15	8,20	2,55	43,25	15,40	4,16		
Итого, МДж	485,01						65,37						

Итого поступило: $40,55+3,26+0,65+0,02 = 44,48$.

– получено:

а) с пылью: $44,48 \cdot 3,00/100,00 = 1,33$,

где 3,00 – пылевывнос, %;

б) с массой: 26,38 (см. табл. 2.9);

Итого получено: $1,33+ 26,38 = 27,71$.

– прореагировало, моль: $(44,48- 27,71)/87,91 = 0,1907$;

– выделено тепла, МДж: $0,1907 \cdot 502,82 = 95,87$,

где 502,82 – тепловой эффект реакции (2.20) при 1473 К, МДж/моль.

По реакции (2) количество РК (S_2 , молярная масса 64,12), кг:

– поступило:

а) с медным концентратом:

$16,48 \cdot 0,50+13,10 \cdot 0,25 = 11,51$,

где 16,48; 13,10 – масса серы в виде FeS_2 и $CuFeS_2$, соответственно, (см. табл. 1); 0,50; 0,25 – доля серы, выделяющейся в виде элементарной из соответствующих высших сульфидов.

Итого поступило: 11,51

– получено:

а) с пылью $11,51 \cdot 3,00 /100,00 = 0,35$.

Итого получено: 0,35.

– прореагировало, моль: $(11,51- 0,35)/64,12 = 0,1742$;

– выделено тепла, МДж: $0,1742 \cdot 720,00 = 125,57$,

где 720,96 – тепловой эффект реакции (2) при температуре 1473 К, МДж/моль.

По реакции (3) количество РК (ZnS , молярная масса 97,44), кг:

– поступило:

а) с медным концентратом: 6,71 (см. табл. 1);

б) с оборотным концентратом: 0,41 (см. табл. 2);

в) с клинкером: 0,37 (см. табл. 3);

Итого поступило: 7,49.

– получено:

а) с пылью: $7,49 \cdot 3,00/100,00 = 0,22$;

б) со штейно-шлаковой массой: 1,03 (см. табл.9).

Итого получено: 1,26,

– прореагировало, моль: $(7,49 - 1,03)/97,44 = 0,0640$;

– выделено тепла, МДж: $0,0640 \cdot 461,11 = 29,49$,

где 461,11 – тепловой эффект реакции (2.22) при температуре 1473 К, МДж/моль.

Количества тепла, полученные в результате протекания остальных реакций, рассчитаны аналогично.

Итого приход тепла, МДж: 485,01.

Расход тепла, МДж:

к) тепло пыли Q_{10} при температуре 600 К:

$$Q_{10} = 6,02 \cdot 1,0 \cdot (600 - 273)/1000 = 1,97;$$

где 1,0 – средняя теплоемкость пыли, Дж/(г·град);

л) тепло массы Q_{11} при температуре 1473 К (табл.13):

$$Q_{11} = 113,68 \cdot 0,831 \cdot (1473 - 273)/1000 = 113,39;$$

Таблица 13

Теплоемкость массы, Дж/(г·град)

Компонент	$H_i = A \cdot 10^{-8} T^2 + B \cdot 10^{-4} T + C$			H_i	C_i , мас. %	$\frac{H_i C_i}{100}$
	A	B	C			
Cu_2S	0	0,00	0,5634	0,5634	19,10	0,108
FeS	0	0,00	0,7116	0,7116	23,21	0,165
Fe_3O_4	20	-5,14	1,1671	0,8439	6,09	0,051
$2FeO \cdot SiO_2$	-185	63,05	-4,1871	1,0862	30,72	0,334
ZnO	0	1,05	0,539	0,6937	2,82	0,020
SiO_2	-1	1,76	1,033	1,2706	6,61	0,084
$2CaO \cdot SiO_2$	75	-24,08	3,4593	1,5396	4,54	0,070
Итого					93,09	0,831

м) тепло отходящего газа Q_{12} при температуре 1473 К (табл.14):

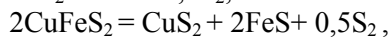
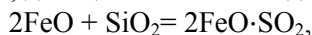
$$Q_{12} = 166,69 \cdot 1,3134 \cdot (1473 - 273) / 1000 = 262,72;$$

Таблица 14

Теплоемкость отходящего газа, Дж/(г·град)

Компонент	$H_i = A \cdot 10^{-8} T^2 + B \cdot 10^{-4} T + C$			H_i	C_i , мас. %	$\frac{H_i C_i}{100}$
	A	B	C			
SO ₂	-2	1,39	0,7554	0,9168	20,34	0,1864
SO ₃	-3	1,69	0,8352	1,0190	4,24	0,0432
H ₂ O	-13	9,57	1,4759	2,6035	10,77	0,2803
CO ₂	-5	2,58	1,0367	1,3082	9,65	0,1262
N ₂	-7	3,01	0,9407	1,2322	54,49	0,6714
O ₂	-2	1,52	0,9453	1,1258	0,52	0,0059
Итого					100,00	1,3134

н) тепло эндореакций Q_{13} при температуре 1473 К (65,37 МДж, см. табл.12) рассчитано аналогично теплу экзореакций. Реакции, дающие основной эндотермический эффект при плавке:



о) тепло испарения воды Q_{14} :

$$Q_{14} = (1,08 \cdot 18,00 / 2,00) \cdot 2,27 = 22,09;$$

где 1,08 – масса водорода в твердых компонентах шихты (см. табл.11);

2,27 – теплота испарения воды, Дж/кг;

п) потери тепла в окружающее пространство Q_{15} при внутренней температуре кожуха печи 1473 К и его наружной температуре 473 К: – интенсивность теплопотерь q , кДж/ч, (рис. 2):

$$\frac{(T_{\text{внутр}} - T_{\text{наружн}}) \cdot F_{\text{корп}} \cdot 3,6}{\frac{s_1}{\lambda_1} + \frac{s_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{s_n}{\lambda_n} + \frac{1}{\alpha_{\text{конв}}}},$$

где $T_{\text{внутр}}$, $T_{\text{наружн}}$ – температура внутренней и наружной поверхности кожуха, К; s_1, \dots, s_n – толщина первого n -го слоя кладки, м; $\lambda_1 \dots \lambda_n$ – коэффициент теплопроводности материалов первого n -го слоя кладки, Вт/(м·град), при средней температуре слоя; $\alpha_{\text{конв}}$ – коэффициент конвективной теплоотдачи от наружной поверхности кладки к воздуху, Вт/град; $F_{\text{корп}}$ – площадь наружной поверхности корпуса, м²; 3,6 – коэффициент перевода Вт/ч в кДж/ч;

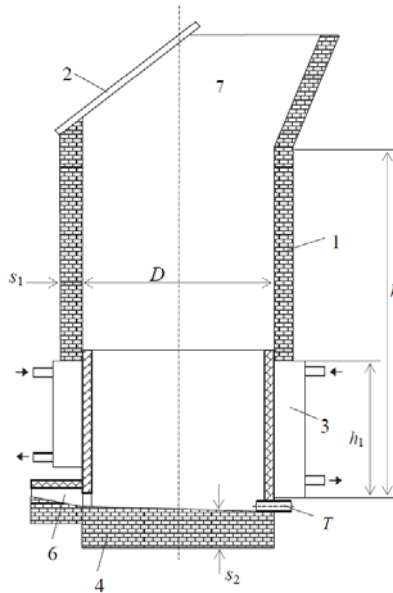


Рис. 2. Печь Аусмелт: 1 – шахта; 2 – водоохлаждаемый свод; 3 – водоохлаждаемый кессон; 4 – лещадь; 5 – летка аварийного слива массы; 6 – переточный сифон; 7 – газоход

– интенсивность потерь тепла через корпус $q_{15.1}$, МДж/ч (слой огнеупора ХМ, $s_1=0,48$, $\lambda_1 = 2,16$; $\alpha_{\text{конв}} = 11,63$):

$$q_{15.1} = \frac{(1473 - 473) \cdot 135,12 \cdot 3,6}{\left(\frac{0,48}{2,16} + \frac{1}{11,63}\right) \cdot 100} = 1578,2$$

где 135,12 – площадь наружной поверхности корпуса $F_{\text{корп}}$, м²:

$$F_{\text{корп}} = 3,14 \cdot (5,00 + 2 \cdot 0,48) \cdot (11,22 - 4,00) = 135,12,$$

где 5,00 – внутренний диаметр печи, м; 11,22 – высота печи, м; 4,00 – высота кессонов печи, м;

– интенсивность потерь тепла через лещадь $q_{15.2}$, МДж/ч (слой огнеупора ХМ, $s_2 = 0,84$, $\lambda_2 = 2,16$):

$$q_{15.2} = \frac{(1473 - 473) \cdot 19,63 \cdot 3,6}{\left(\frac{0,84}{2,16}\right) \cdot 100} = 218,0$$

где 19,63 – площадь лещади печи $F_{\text{лещадь}}$, м²:

$$F_{\text{лещадь}} = 3,14 \cdot 5,00^2 / 4 = 19,63$$

$$Q_{15} = (q_{15.1} + q_{15.2}) \tau = (1578,2 + 218,0) \cdot 0,0025 = 4,49;$$

р) потери тепла с охлаждающей водой Q_{16} :

$$Q_{16} = 300 \cdot 0,0025 \cdot (325 - 318) \cdot 4,186 = 21,98,$$

где 300 – заданный расход охлаждающей воды, м³/ч; 325, 318 – температура охлаждающей воды конечная и исходная, К.

Допустимая для технологических расчетов невязка теплового баланса (табл.15) свидетельствует о верности его расчета.

Таблица 15

Тепловой баланс выплавки штейна

Статья прихода	Количество тепла		Статья расхода	Количество тепла	
	МДж	%		МДж	%
1. Тепло Си концентрата	2,00	0,41	10. Тепло пыли	1,97	0,40
2. Тепло об. концентрата	0,60	0,12	11. Тепло массы	113,39	23,05
3. Тепло клинкера	0,20	0,04	12. Тепло газов	262,72	53,40
4. Тепло кварц. флюса	0,09	0,02	13. Тепло эндореакций	65,37	13,29
5. Тепло извест. флюса	0,05	0,01	14. Тепло испар. воды	22,09	4,49
6. Тепло прир. газа	0,23	0,05	15. Потери в окр. пр.	4,49	0,91
7. Тепло кислорода	0,67	0,14	16. Потери с охл. водой	21,98	4,47
8. Тепло воздуха	3,17	0,64			
9. Тепло экзореакций	485,01	98,58			
Всего приход	492,02	100,00	Всего расход	492,00	100,00
			Невязка	-0,01	0,00

ОСНОВНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПРОЦЕССА

1) извлечение меди в штейн, %:

$$17,34 \cdot 100/100,00=97,00,$$

где 17,34 – масса меди в штейне, кг; 17,88 – масса меди в шихте (концентрат и клинкер), кг;

2) выход шлака от медного концентрата, %:

$$55,87 \cdot 100/100,00=55,87$$

3) расход на 1 т медного концентрата:

– кварцевый флюс, т $4,58 / 100 = 0,046,$

– известковый флюс, т $2,48 / 100 = 0,025,$

– технический кислород, м³ $13,61 \cdot 1000/100,00 = 136,1,$

– отходящий газ, нм³ $116,9 \cdot 1000/100,00 = 1169;$

4) степень десульфуризации шихты при плавке, %:

$$19,79 \cdot 1000/35,17 = 56,28,$$

где 19,79 – масса серы в отходящем газе, кг; 35,17 – масса серы в шихте, кг.

РЕКОМЕНДУЕМЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Марченко Н.В.* Металлургия тяжелых цветных металлов: практикум / Н.В. Марченко, Е.П. Вершинина, Э.М. Гильдебрандт. Красноярск: ИПК СФУ, 2009. 162 с.
2. *Можарин В.П.* Производство цветных металлов. Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2007. 410 с.
3. *Уткин Н.И.* Производство цветных металлов. М.: Интермент Инжиниринг, 2004. 442 с.
4. *Набойченко С.С.* Расчеты гидрометаллургических процессов: Учебное пособие для вузов / С.С. Набойченко, А.А. Юнь. М.: МИСИС, 1995. 428 с.
5. *Набойченко С.С.* Процессы и аппараты цветной металлургии: Учебник для вузов / С.С. Набойченко, И.Г. Агеев, А.П. Дорошкевич и др. Екатеринбург: УГТУ, 1997. 648 с.
6. *Карпетьянц М.Х.* Основные термодинамические константы. М.: Химия, 1975. 329 с.
7. *Мастюгин С.А.* Типовое оборудование для гидрометаллургических процессов: учебное пособие / С.С. Набойченко, С.А. Мастюгин, Н.А. Волкова. Екатеринбург: Изд-во УГТУ-УПИ, 2010.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Цели и задачи курсового проектирования	3
2. Организация выполнения курсового проекта	3
3. Пример выполнения курсового проекта	7
3.1. Задание	7
3.2. Технологические расчеты	8
Рекомендуемый библиографический список.....	43

МЕТАЛЛУРГИЯ ТЯЖЕЛЫХ И БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ

*Методические указания по курсовому проектированию
для студентов магистратуры направления 22.04.02*

Сост.: *Г.В. Петров, А.Я. Бодуэн, С.Б. Фокина.*

Печатается с оригинал-макета, подготовленного кафедрой
металлургии

Ответственный за выпуск *Г.В. Петров*

Лицензия ИД № 06517 от 09.01.2002

Подписано к печати 30.06.2020. Формат 60×84/16.
Усл. печ. л. 2,5. Усл.кр.-отт. 2,5. Уч.-изд.л. 2,3. Тираж 50 экз. Заказ 465.

Санкт-Петербургский горный университет
РИЦ Санкт-Петербургского горного университета
Адрес университета и РИЦ: 199106 Санкт-Петербург, 21-я линия, 2