

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

**Кафедра обогащения полезных ископаемых**

# **ФЛОТАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ОБОГАЩЕНИЯ**

*Методические указания к практическим занятиям  
для студентов специальности 21.05.04*

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ**  
**2019**

УДК 622.7 (073)

**ФЛОТАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ОБОГАЩЕНИЯ:** Методические указания к практическим занятиям / Санкт-Петербургский горный университет. Сост.: *Т.Н. Александрова, А.О. Ромашев*. СПб, 2019. 30 с.

Приведены рекомендации по выполнению практических работ по дисциплине «Флотационные методы обогащения», а также перечень основных теоретических сведений, расчетные формулы, требования к содержанию и оформлению работ, перечень вариантов заданий.

Предназначены для студентов специальности 21.05.04 «Горное дело» специализации «Обогащение полезных ископаемых».

Научный редактор проф. *В.Ю. Бажин*

Рецензент проф. *А.В. Александров* (СПбГУПТД)

## ВВЕДЕНИЕ

Выполнение практических работ является неотъемлемой частью изучения дисциплины «Флотационные методы обогащения». Приведенные в методических указаниях работы способствуют формированию базовых знаний в области флотационного обогащения полезных ископаемых и подготовке к решению профессиональных задач, связанных с физико-химическими методами разделения минералов, а также получение навыков расчета флотационных схем обогащения и использование полученных знаний при организационно-управленческой и научно-исследовательской деятельности.

Оформление пояснительной записки должно строго соответствовать правилам оформления работ в Горном университете.

### 1. РАСЧЁТ БАЛАНСА СХЕМЫ ФЛОТАЦИОННОГО ОБОГАЩЕНИЯ

#### 1.1. Теоретическая информация

Расчёты схем любых процессов обогащения осуществляются по единой методике. Исходные показатели по содержанию ценных компонентов в исходном питании и всех продуктах обогащения устанавливаются на основании результатов научно-исследовательских работ по обогатимости данного вида сырья или практики работы обогатительных фабрик, перерабатывающих аналогичные руды. Для действующих предприятий исходные показатели для расчёта схем принимаются по результатам опробования.

В практике обогащения чаще всего применяются следующие технологические показатели:

- $\gamma$  – выход от исходного продукта,
- $\beta$  – содержанием расчетного компонента в продукте,
- $\varepsilon$  – извлечение расчетного компонента от исходного питания.

*Содержанием расчетного компонента  $\beta$  в продукте* называется, выраженное в процентах, количество расчетного компонента в составе продукта и определяется как отношение массы

расчетного компонента в продукте к массе продукта, в котором он находится.

$$\beta_i = \frac{P_i}{Q_i} \cdot 100 \quad (1)$$

где  $Q_i$  – масса  $i$ -го продукта;  $P_i$  – масса расчетного компонента в  $i$ -ом продукте.

*Выходом продукта  $\gamma$*  называется, выраженное в процентах, отношение массы выделенного продукта к массе исходного сырья, из которого выделен продукт.

Для простейшего случая, когда из продукта 1 получают продукт 2 и продукт 3 (рис. 1), выходы находят по формулам:

$$\gamma_1 = 100;$$

$$\gamma_2 = \frac{Q_2}{Q_1} \cdot 100$$

$$\gamma_3 = \frac{Q_3}{Q_1} \cdot 100$$

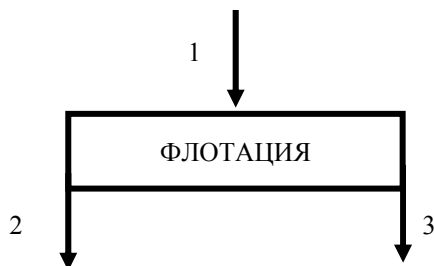


Рис. 1. Простейший трехпродуктовый узел

В том случае, когда  $i$ -ый продукт получают в схеме, питанием которой является продукт 1 (рис. 2), обычно принимаемый за 100%, очевидно, что выход любого продукта от исходного питания будет равен:

$$\gamma_i = \frac{Q_i}{Q_1} \cdot 100 \quad (2)$$

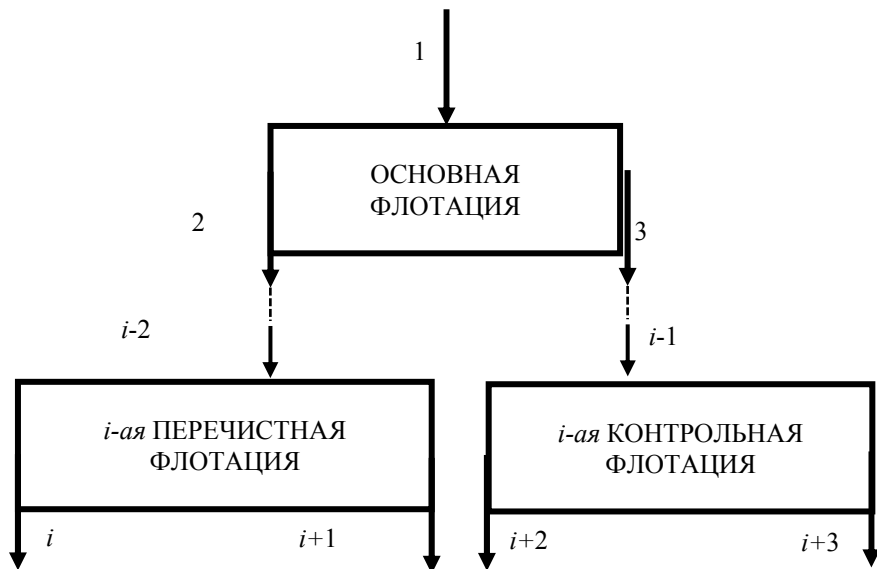


Рис. 2. Пример принципиальной схемы обогащения

*Извлечение расчетного компонента*  $\varepsilon$  называется технологический показатель, характеризующий полноту перехода расчетного компонента в продукт в процессе обогащения и определяется как отношение массы расчетного компонента в продукте к массе того же компонента в исходном полезном ископаемом.

По аналогии с расчетом выходов, для извлечений от операции имеем:

$$\varepsilon_1 = 100;$$

$$\varepsilon_2 = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100;$$

$$\varepsilon_3 = \frac{P_3}{P_1} \cdot 100,$$

а от исходного питания:

$$\varepsilon_i = \frac{P_i}{P_1} \cdot 100. \quad (3)$$

Для простого трехпродуктового узла справедлива система балансовых уравнений по массам продуктов и решетного компонента.

$$Q_2 + Q_3 = Q_1 \quad (4)$$

$$P_2 + P_3 = P_1 \quad (5)$$

Выразив из (1) значения  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  и преобразовав (5), получаем уравнение баланса по расчетному компоненту:

$$\beta_2 Q_2 + \beta_3 Q_3 = \beta_1 Q_1 \quad (6)$$

или разделив обе части на  $Q_1$  и умножив на 100 получаем:

$$\beta_2 \gamma_2 + \beta_3 \gamma_3 = \beta_1 100 \quad (7)$$

Выразив из (4) значение  $Q_3$  и подставляя его в (6), а также осуществив раскрытие скобок и группировку членов с одинаковыми индексами  $Q$  получаем:

$$Q_2(\beta_2 - \beta_3) = Q_1(\beta_1 - \beta_3)$$

Умножив обе части на 100 и используя (2) окончательно получаем:

$$\gamma_2 = \frac{(\beta_1 - \beta_3)}{(\beta_2 - \beta_3)} \cdot 100 \quad (8)$$

Значение  $\gamma_3$  можно найти, аналогично выразив из (4) значение  $Q_2$ :

В окончательном виде:

$$\gamma_3 = \frac{(\beta_1 - \beta_2)}{(\beta_3 - \beta_2)} \cdot 100 \quad (9)$$

Используя формулу (1) и выражение (3) для продукта 2 (рис. 1) получаем:

$$\varepsilon_2 = \frac{Q_2 \beta_2}{Q_1 \beta_1} = \frac{\gamma_2 \beta_2}{\beta_1}.$$

Форма записи расчетов основного баланса металла качественно-количественной схемы для однокомпонентной руды представлена в табл. 1.

Таблица 1

**Пример оформления результатов расчета схемы баланса продуктов**

Номер операции и продукта	Наименование операции и продукта	$Q$ , т/ч	$\beta$ , %	$\gamma$ , %	$\varepsilon$ , %	$P$ , т/ч
	<u>Поступает:</u>					
1	Исходная руда	204,74	<b>9,70</b>	100,00	100,00	19,86
	<b>Итого:</b>	204,74	9,70	100,00	100,00	19,86
	<u>Выходит:</u>					
17	Концентрат	26,36	<b>67,75</b>	12,87	<b>89,91</b>	17,86
16	Хвосты	178,38	<b>1,12</b>	87,13	10,09	2,00
	<b>Итого:</b>	204,74	9,70	100,00	100,00	19,86

## 1.2. Задания на расчет баланса схемы флотационного обогащения

Произвести расчет баланса схемы флотационного обогащения схемы обогащения определив относительные показатели  $\gamma$ ,  $\beta$ ,  $\varepsilon$ , а затем определив абсолютные показатели –  $Q$  и  $P$  для каждого продукта. Исходные данные для расчета приведены в таблицах 1.1 – 1.7. В отчете о выполнении практической работы требуется привести: исходные данные, общий вид схемы по которой будет производиться расчет; ход расчета, схему с заполненной легендой для каждого продукта.

Таблица 1.1

**Исходные данные для расчета баланса схемы флотационного обогащения (тип руды *Си* (порфировая))**

Тип руды	Вариант	$\beta_{\text{кон}}$	$\beta_{\text{исх}}$	$\epsilon_{\text{кон}}$	$Q_{\text{исх}}$ , т/г
<i>Си</i> (порфировая)	<b>1</b>	21,5	0,4	85	18000000
<i>Си</i> (порфировая)	<b>2</b>	22,7	0,6	86,2	10000000
<i>Си</i> (порфировая)	<b>3</b>	24,4	1	86,1	600000
<i>Си</i> (порфировая)	<b>4</b>	23,7	1,3	84,5	900000
<i>Си</i> (порфировая)	<b>5</b>	23,9	0,6	84,6	1500000
<i>Си</i> (порфировая)	<b>6</b>	29,42	3,7	89,4	330000
<i>Си</i> (порфировая)	<b>7</b>	25	3,5	85	800000
<i>Си</i> (порфировая)	<b>8</b>	31	4,4	91	700000
<i>Си</i> (порфировая)	<b>9</b>	30	2,9	94	900000
<i>Си</i> (порфировая)	<b>10</b>	30	2,9	94	400000

Таблица 1.2

**Исходные данные для расчета баланса схемы флотационного обогащения (тип руды *P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>*)**

Вариант	$\beta_{\text{кон}}$	$\beta_{\text{исх}}$	$\epsilon_{\text{кон}}$	$Q_{\text{исх}}$ , т/г
<i>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></i> <b>1</b>	39,26	13,5	94,28	20000000
<i>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></i> <b>2</b>	39,11	12,59	89,23	17000000
<i>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></i> <b>3</b>	39,34	12,86	88,85	24000000
<i>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></i> <b>4</b>	39,16	12,9	86,25	23000000
<i>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></i> <b>5</b>	39,1	12,52	94,37	16000000
<i>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></i> <b>6</b>	29,42	3,7	89,4	330000
<i>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></i> <b>7</b>	25	3,5	85	800000



$P_2O_5$	<b>8</b>	31	4,4	91	700000
$P_2O_5$	<b>9</b>	30	2,9	94	900000
$P_2O_5$	<b>10</b>	30	2,9	94	400000

Таблица 1.3

**Исходные данные для расчета баланса схемы флотационного обогащения (тип руды *Au*)**

Вариант		$\beta_{\text{кон}}$	$\beta_{\text{исх}}$	$\epsilon_{\text{кон}}$	$Q_{\text{исх}}$ , т/г
<i>Au</i>	<b>1</b>	66,25	11,4	93,01	500000
<i>Au</i>	<b>2</b>	68,05	11,4	93,41	1000000
<i>Au</i>	<b>3</b>	66,85	10,1	91,91	600000
<i>Au</i>	<b>4</b>	68,05	9,4	90,31	900000
<i>Au</i>	<b>5</b>	69,45	8,6	89,21	1500000
<i>Au</i>	<b>6</b>	29,42	3,7	89,4	330000
<i>Au</i>	<b>7</b>	25	3,5	85	800000
<i>Au</i>	<b>8</b>	31	4,4	91	700000

Таблица 1.4

**Исходные данные для расчета баланса схемы флотационного обогащения  
(тип руды *Cu-Mo*)**

Вариант	медь						молибден			$\epsilon_{Cu,кон}$	$\epsilon_{Mo,кон}$	$Q_{лихв.т/г}$
	$\beta_{Cu,кон}$	$\beta_{Mo,кон}$	$\beta_{лихв}$	$\beta_{Cu,кон}$	$\beta_{Mo,кон}$	$\beta_{лихв}$						
<i>Cu-Mo</i>	23,00	0,0630	0,56	0,040	50,57	0,0200	86,00	46,00	20000000			
<i>Cu-Mo</i>	22,95	0,0480	0,54	0,068	45,82	0,0240	87,15	44,55	25000000			
<i>Cu-Mo</i>	24,72	0,0780	0,59	0,050	46,04	0,1000	91,08	41,32	15000000			
<i>Cu-Mo</i>	25,19	0,0708	0,62	0,070	47,45	0,0700	90,58	41,89	17000000			
<i>Cu-Mo</i>	22,89	0,0600	1,10	0,900	47,90	0,0860	90,03	45,53	20000000			
<i>Cu-Mo</i>	25,87	0,0949	0,90	1,090	47,53	0,0892	88,32	40,25	18000000			
<i>Cu-Mo</i>	25,86	0,0483	0,61	0,470	50,43	0,0042	83,91	47,43	13000000			
<i>Cu-Mo</i>	29,77	0,0539	0,65	0,420	49,62	0,0204	83,68	51,31	23000000			
<i>Cu-Mo</i>	30,80	0,0633	0,75	1,500	48,35	0,0197	84,54	52,34	10000000			
<i>Cu-Mo</i>	30,47	0,0663	0,79	0,370	49,07	0,0118	81,60	50,35	24000000			
<i>Cu-Mo</i>	31,90	0,0912	0,79	0,770	49,07	0,0060	77,66	51,51	16000000			
<i>Cu-Mo</i>	33,09	0,0729	0,85	1,760	46,99	0,0123	78,81	47,40	19000000			

Таблица 1.5

**Исходные данные для расчета баланса схемы флотационного обогащения  
(тип руды *Cu-Zn*)**

Вариант	медь			цинк			$\varepsilon_{Cu}$ кон	$\varepsilon_{Zn}$ кон	$Q_{\text{лех}}$ , т/г
	$\beta_{Cu}$ кон	$\beta_{Zn}$ кон	$\beta_{\text{лех}}$	$\beta_{Cu}$ кон	$\beta_{Zn}$ кон	$\beta_{\text{лех}}$			
	<i>Cu-Zn</i> <b>1</b>	21,00	5,000	1,50	1,00	48,00			
<i>Cu-Zn</i> <b>2</b>	20,00	3,890	1,99	2,70	42,26	2,420	90,20	72,8	20000000
<i>Cu-Zn</i> <b>3</b>	23,00	3,862	2,50	3,03	43,76	2,296	89,25	60,3	17000000
<i>Cu-Zn</i> <b>4</b>	25,10	3,910	2,54	2,90	42,65	2,420	86,34	80,8	13000000
<i>Cu-Zn</i> <b>5</b>	20,80	3,780	1,80	2,76	45,66	2,430	90,10	74,8	10000000
<i>Cu-Zn</i> <b>6</b>	20,49	1,900	0,84	3,41	46,33	2,384	84,00	66,9	18000000
<i>Cu-Zn</i> <b>7</b>	25,18	4,042	3,16	1,71	48,43	2,603	89,20	68,0	300000
<i>Cu-Zn</i> <b>8</b>	23,96	4,208	2,56	2,56	48,97	2,552	88,70	78,4	150000
<i>Cu-Zn</i> <b>9</b>	24,17	3,985	4,38	2,09	49,92	2,474	91,00	60,1	400000

Таблица 1.6

Исходные данные для расчета баланса схемы флотационного обогащения (тип руды *Cu-Ni*)

Вариант	медь			никель			$\varepsilon_{Cu}$ кон	$\varepsilon_{Ni}$ кон	$Q_{исх.}$ т/г
	$\beta_{Cu}$ кон	$\beta_{Ni}$ кон	$\beta_{исх}$	$\beta_{Cu}$ кон	$\beta_{Ni}$ кон	$\beta_{исх}$			
	<i>Cu-Ni</i> 1	24,61	1,31	2,05	3,43	5,61			
<i>Cu-Ni</i> 2	25,69	1,21	2,30	3,70	7,75	0,80	87,27	62,30	25000000
<i>Cu-Ni</i> 3	21,31	0,98	1,82	2,60	5,43	0,75	80,21	68,00	10000000
<i>Cu-Ni</i> 4	29,78	0,96	3,34	2,78	7,40	0,792	85,11	78,80	16000000
<i>Cu-Ni</i> 5	27,7	1,42	2,68	1,78	5,85	0,66	77,89	71,40	20000000

Таблица 1.7

Исходные данные для расчета баланса схемы флотационного обогащения (тип руды *Pb-Zn*)

Вариант	МЕДЬ			ЦИНК			$\varepsilon_{Cu}$ кон	$\varepsilon_{Zn}$ кон	$Q_{исх.}$ т/г
	$\beta_{Cu}$ кон	$\beta_{Zn}$ кон	$\beta_{исх}$	$\beta_{Cu}$ кон	$\beta_{Zn}$ кон	$\beta_{исх}$			
	<i>Pb-Zn</i> 1	18,0	3,000	1,50	1,00	48,00			
<i>Pb-Zn</i> 2	20,0	3,890	1,99	2,70	42,26	2,4200	90,20	72,8	25000000
<i>Pb-Zn</i> 3	23,0	3,736	2,50	5,05	41,70	2,462	89,25	60,3	15000000
<i>Pb-Zn</i> 4	25,1	3,910	2,54	2,90	42,01	2,42	86,34	80,8	17000000
<i>Pb-Zn</i> 5	20,8	3,780	1,80	2,76	45,66	2,430	90,10	74,8	10000000

## 2. РАСЧЕТ КАЧЕСТВЕННО-КОЛИЧЕСТВЕННЫХ СХЕМ ФЛОТАЦИИ

### 2.1. Теоретическая информация

Расчет качественно-количественных схем флотации производится сначала в относительных показателях –  $\gamma$ ,  $\beta$ ,  $\varepsilon$ , а затем определяются абсолютные показатели –  $Q$  и  $P$ . Для расчета схемы используют исходные показатели, которые представляют относительные технологические показатели и назначаются на основе показателей работы обогатительной фабрики или исследовательских работ. Численные значения остальных относительных показателей определяются в результате расчета.

Число исходных показателей должно быть строго определенным, так как при избыточном их количестве баланс продуктов может не сходиться и потребуются устранить невязку, а при малом – расчет схемы невозможен.

Задание необходимых и достаточных показателей для расчета технологической схемы:

Общее число необходимых и достаточных показателей:

$$N_c = c \cdot (n_p - a_p + 1) - 1 \quad (10)$$

где  $c$  – число расчетных компонентов,  $n_p$  – число продуктов разделения,  $a_p$  – число операций разделения.

Из общего числа показателей к продуктам разделения должно относиться следующее количество показателей:

$$N_c = c \cdot (n_p - a_p) \quad (11)$$

Из числа продуктов разделения к исходным количествам показателей должно относиться следующее количество показателей:

$$N_{исх} = N - N_{пр}.$$

Как правило при  $\gamma_1 = 100\%$ ,  $\varepsilon_1 = 100\%$  это содержания расчетных компонентов в исходной руде.

Число данных, которые могут относиться к извлечениям можно определить как:

$$N_{\varepsilon} = n_p - a_p, \quad (12)$$

как правило, это извлечение в концентратные продукты.

Число данных относящиеся к содержаниям:

$$N_{\beta} = N_{\text{пр}} - N_{\varepsilon} \quad (13)$$

По данным отчетов по НИР, практики работы фабрик, перерабатывающих аналогичные руды, или по результатам опробования технологической схемы принимают численные значения исходных показателей: содержание в исходной руде  $\beta_{\text{исх}}$ , %, в концентратах схемы  $\beta_{\text{кон}}$ , %, извлечение ценного компонента в конечный концентрат от руды  $\varepsilon_k$ , %.

1. Для продуктов с известным содержанием ценного определяют выход:

$$\gamma_i = \frac{\varepsilon_i \beta_1}{\beta_i} \quad \text{или} \quad \gamma_{i+1} = \frac{\beta_1 - \beta_{i+2}}{\beta_{i+1} - \beta_{i+2}},$$

где  $\beta_{i+1}$  и  $\beta_{i+2}$  – содержание в соответствующих продуктах одного узла технологической схемы

3. Выходы остальных продуктов схемы определяют по уравнениям баланса.

4. Содержание металла в продуктах схемы с известными извлечениями и выходами определяют по формуле:

$$\beta_i = \frac{\varepsilon_i \beta_1}{\gamma_i}$$

5. Массу продуктов в схеме определяют по формуле:

$$Q_i = \gamma_i Q_1 \cdot 100, \text{ т/ч, т/сут};$$

массу металла в продуктах – по формуле:

$$P_i = \varepsilon_i P_1 \cdot 100, \text{ т/ч, т/сут}.$$

Результаты расчета частного баланса металлов по продуктам и операциям даны в табл. 2.1

Таблица 2.1

**Пример оформления части расчета качественно-количественной схемы флотации**

№ операции и продукта	Наименование операции и продукта	$Q_i$ , т/ч	$\beta_i$ , г/т	$\gamma_i$ , %	$\epsilon_i$ , %	$P$ , т/ч
IV	<b>II перерасчетка</b>					
	<u>Поступает:</u>					
18	Хвосты III перерасчетки	17,54	39,50	8,57	34,89	6,93
7	Концентрат I перерасчетки	51,24	43,46	25,03	112,14	22,27
12	<b>Итого:</b>	68,79	42,45	33,60	147,03	29,20
	<u>Выходит:</u>					
13	Концентрат II перерасчетки	43,90	56,46	21,44	124,80	24,79
14	Хвосты II перерасчетки	24,89	17,74	12,16	22,23	4,41
	<b>Итого:</b>	68,79	42,45	33,60	147,03	29,20

**2.2. Задания на расчет качественно-количественных схем флотации**

Разработать и обосновать схему флотационного обогащения. Произвести расчет качественно-количественной схемы флотационного обогащения определив относительные показатели –  $\gamma$ ,  $\beta$ ,  $\epsilon$ , а затем определить абсолютные показатели –  $Q$  и  $P$  для каждого продукта схемы.

Исходные данные для расчета и тип руды приведены в работе 1.

В отчете о выполнении практической работы требуется привести: исходные данные, общий вид схемы по которой будет производиться расчет; пример расчета трех узлов, заполненную таблицу по результатам расчета (см. таблицу 2), схему с заполненной легендой для каждого продукта.

### 3. РАСЧЕТ ВОДНО-ШЛАМОВЫХ СХЕМ ФЛОТАЦИИ

#### 3.1. Теоретическая информация

Целью расчета шламовой схемы является:

- обеспечение оптимальных отношений  $R=Ж:Т$  в технологических операциях схемы;
- определение количеств воды, добавляемой в операции и уходящей с конечными продуктами обогащения;
- составление баланса воды и определение удельного расхода воды.

Расчет схемы начинается с установления оптимальных значений  $R$  в технологических операциях. Любой мокрый обогатительный процесс может дать наилучшие результаты разделения исходного продукта при строго определенном оптимальном соотношении  $Ж:Т$ .

Оптимальные значения  $R$  в схеме принимаются по результатам исследований сырья на обогатимость и по результатам работы действующей фабрики. Эти значения  $R$  являются первой группой исходных показателей при расчете шламовой схемы. Кроме оптимальных значений  $R$  в операциях разделения в качестве исходных показателей при расчете схемы принимают также значения  $R$  в определенных продуктах разделения. В каждой технологической операции можно выбрать один или два продукта с заранее известным значением  $R$ . Эти значения  $R$  принимаются в качестве второй группы исходных показателей при расчете шламовой схемы.

Расчет схемы производится на основе следующих соотношений и зависимостей:

$$W = QR; \quad (14)$$

$$R = (100-P)/P;$$

$$V = Q(R + 1/\delta); \quad (15)$$

$$P = \frac{100}{1+R} = \frac{Q}{Q+W}$$



где  $P$  – процент твердого, %;  $W$  – количество воды в операции или продукте, м<sup>3</sup>/ч;  $R$  – весовое отношение жидкого к твердому в операции или продукте;  $\delta$  – плотность твердого, т/м<sup>3</sup>;  $V$  – объем пульпы в продукте, м<sup>3</sup>/ч.

Расчет шламовой схемы производится в следующем порядке:

1. На основе практических данных действующей фабрики или установленных норм принимаются численные значения исходных показателей  $R$ .

2. Имея производительность каждой операции по твердому, рассчитывают количество воды для операции и продуктов, по которым приняты исходные показатели по формуле (14).

3. По уравнению баланса определяют количество воды, добавляемое в другие операции, продукты, и подсчитывают расход дополнительной воды в операциях, где он неизвестен.

4. По формуле (14) подсчитывают  $R$  в операциях и продуктах, для которых  $R$  не были заданы.

5. По формуле (15) рассчитывают производительность по объему пульпы для всех продуктов и операций.

Результаты расчета оформляют в виде таблицы (табл. 3.1).

Таблица 3.1

**Пример результатов расчета водно-шламовой схемы**

№ операции, продукта	Наименование операции и продукта	$Q$ , т/ч	$R$	$W$ , м <sup>3</sup> /ч	$V$ , м <sup>3</sup> /ч
I	<b><u>Основная флотация</u></b>				
	<b><u>Поступает:</u></b>				
1	Исходная руда	204,74	3,44	705,22	781,61
8	Хвосты I перечистной флотации	52,62	6,92	363,95	383,58
9	Концентрат I контрольной флотации	25,95	2,13	55,15	64,83
	Вода для транспортировки концентрата			25,95	25,95
2 = I	<b>Итого:</b>	283,31	4,06	1150,26	1255,97
	<b><u>Выходит:</u></b>				
3	Концентрат основной флотации	78,97	1,86	146,66	176,13
4	Хвосты основной флотации	204,34	4,91	1003,60	1079,84
2 = I	<b>Итого:</b>	283,31	4,06	1150,26	1255,97

В итоге расчета составляют баланс водопотребления и водоотведения по фабрике.

По результатам расчета шламовой схемы составляем баланс общей и свежей воды по отделению измельчения и флотации (табл. 3.2).

Таблица 3.2

**Баланс воды по фабрике**

Поступает в процесс, м <sup>3</sup> /ч		Уходит из процесса, м <sup>3</sup> /ч	
С исходной рудой $W$	7,50	С концентратом 12	
В измельчение I $L_1$	67,50	$W_{12}+L_{12}$	90,0
В классификацию II $L_{II}$	337,50	С хвостами 17 $W_{17}$	616,25
В измельчение III $L_{III}$	37,50		
В 1-ю перемешку V $L_V$	33,75		
Во 2-ю перемешку VI $L_{VI}$	50,0		
Для транспортировки концентратов:			
основной флотации			
$l_8 Q_8 = L_8$	62,50		
1-й перемешки			
$l_{10} Q_{10} = L_{10}$	50,0		
контрольной флотации			
$l_{15} Q_{15} = L_{15}$	30,0		
конечного $l_{12} Q_{12} = L_{12}$	30,0		
Всего поступает $W_1 + \sum L$	706,25	Всего уходит $\sum W_k$	706,25

Общий расход воды по фабрике

$$\sum L = \sum W_k - W_1 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Определяют общий расход воды на фабрике и удельный расход на 1 т перерабатываемой руды, м<sup>3</sup>/т.

Обычно при проектировании общий расход увеличивают на 10–15% для учета расхода воды на смыв полов, промывку аппаратов и т.д.

### 3.2. Задачи на расчет водно-шламовых схем флотации

Рассчитать водно-шламовую схему и определить баланс воды по фабрике для разработанной в работе схемы флотации. Производительность по исходной руде и выходы продуктов по каждой схеме приведены в работе 1.

## **4. РАСЧЕТ НЕОБХОДИМОГО КОЛИЧЕСТВА РЕАГЕНТОВ**

### **4.1 Общие сведения о флотационных реагентах**

Флотационные реагенты используются для направленного изменения поверхностной энергии на границе раздела фаз с целью изменения показателя флотуемости разделяемых минералов, числа и размера пузырьков воздуха, прочности пены. Разработка и внедрение новых эффективных реагентов и их сочетаний определяют прогресс в области флотационного обогащения.

Выбор типа и расхода реагентов зависит от принятой технологической схемы флотации и производится на основе данных работы действующих фабрик или результатов промышленных испытаний. При выборе типа реагента следует учитывать, что флотационные реагенты должны удовлетворять следующим основным требованиям:

- 1) иметь постоянный состав;
- 2) быть нетоксичными;
- 3) хорошо растворяться в воде;
- 4) действовать селективно;
- 5) быть эффективными;
- 6) иметь невысокую стоимость;
- 7) быть недефицитными.

Флотационные реагенты могут быть органическими или неорганическими соединениями, а также их растворами или смесями. Часть из них образует в водной фазе пульпы истинные растворы ионно-молекулярной дисперсности, часть растворяется весьма слабо, образуя коллоидно-дисперсные растворы, эмульсии и тонкие взвеси. Номенклатура реагентов насчитывает сотни наименований.

Современная классификация предусматривает разделение флотационных реагентов в зависимости от их роли при флотации на следующие группы.

- собиратели;
- пенообразователи;
- регуляторы среды;
- активаторы;
- депрессоры.

Депрессоры, активаторы и регуляторы среды часто относят к одной группе и называют модификаторами, поскольку один и тот же реагент может выполнять различную роль при флотации.

#### 4.1.1 Собиратели

Собиратели представляют собой органические соединения, которые, избирательно закрепившись на поверхности гидрофильных или гидрофобных минералов, уменьшают их смачиваемость водой (способствует их прилипанию к воздушному пузырьку) или наоборот.

По способности диссоциировать на ионы собиратели подразделяются на ионогенные (распадающиеся на ионы в воде) и неионогенные (не распадающиеся на ионы).

Ионогенные собиратели – электролиты, образующие в растворе заряженные ионы, в состав которых входят функциональные группы и углеводородный радикал. Эти собиратели могут быть анионными, закрепляющимися на поверхности минералов в виде отрицательно заряженных ионов (ксантогенаты, дитиофос, фаты, карбоновые кислоты и др.), и катионными, закрепляющимися на поверхности минералов в виде положительно заряженных ионов (амины и другие органические производные аммиака) применяют в виде солей, особенно уксусной и соляной кислот (аминоацетаты и аминохлориды). Анионные собиратели получили наибольшее распространение в практике флотации.

Также выделяют амфолитные или амфотерные собиратели, которые в зависимости от условий проявляющие свойства как анионоактивных, так и катионоактивных реагентов.

В зависимости от функциональной группы различают оксигидрильные и сульфгидрильные реагенты собиратели. Оксигидрильные собиратели – ионогенные анионные собиратели, в функциональную группу которых входят атомные группы:  $\text{COOH}$ ,  $\text{OH}$ ,  $-\text{OSO}_3$ ,  $\text{SO}_4$  и др. Сульфгидрильные собиратели – ионогенные анионные собиратели, в состав солидофильной группы которых входит двухвалентная сера. Такие собиратели широко применяются при флотации сульфидных и некоторых окисленных минералов цветных металлов.

Неионогенные собиратели – неэлектролиты, это главным образом аполярные водородные жидкости (масла), образующие на поверхности флотируемых минералов гидрофобные пленки.

#### **4.1.2 Пенообразователи**

Представляют собой ПАВ, способные сорбироваться на поверхности «вода-воздух». Их присутствие в пульпе повышает механическую прочность воздушных пузырьков, способствует сохранению их в диспергированном состоянии, улучшая тем самым условия прилипания частиц флотируемого минерала к пузырькам воздуха и устойчивость пены.

По флотационному действию вспениватели делятся на 2 типа: селективно и неселективно действующие. Первые практически не обладают собирательными свойствами при флотационном обогащении, вторые имеют заметные собирательные свойства.

Селективно-действующие вспениватели необходимы для операций, в которых производится разделение близких по флотированию минералов, т.к. наличие у вспенивателя даже очень слабого собирательного действия может вызвать нарушение селективности этого процесса.

#### **4.1.3 Регуляторы среды**

К ним относятся реагенты, изменяющие величину рН среды (известь, кальцинированная сода, серная и соляная кислота).

Важность величины рН обуславливается следующими факторами:

- каждый минерал наиболее эффективно флотируется при строго определенном значении рН.
- от величины рН зависит форма нахождения флотационных реагентов.

Ионы ОН связывают катионы тяжелых металлов и предотвращают связывание собирателей.

#### **4.1.4 Активаторы**

Активаторы — это флотационные реагенты, модификаторы, усиливающие взаимодействие реагентов собирателей с поверхностью флотируемых частиц. Активаторы непосредственно

взаимодействуют с поверхностью извлекаемых частиц. Типичными активаторами являются медный купорос, сернистый натрий и т. д.

#### 4.1.5 Депрессоры

Депрессоры (подаватели) – флотационные реагенты, регуляторы, применяемые для улучшения селективности флотации. Депрессоры закрепляются на поверхности определенных минералов и препятствуют адсорбции собирателя на них, а также гидрофилизуют поверхность этих минералов и тем самым предотвращают их флотацию одновременно с другими минералами. Типичными депрессорами являются соли неорганических кислот, содержащие анионы  $S^{2-}$ ,  $SO_3^{2-}$ ,  $SiO_3^{2-}$ ,  $CN^-$ ,  $H_2SO_3$ , а также известь, углеводы, лигнин, различные органические красители, танин и др.

Различают неорганические и органические депрессоры.

Неорганические депрессоры – соли неорганических кислот, содержащие анионы, сернистый натрий, цианиды, соли цинка, соли хрома, некоторые комплексные соединения, жидкое стекло и др.

Органические депрессоры – высокомолекулярные органические вещества. Органические депрессоры в зависимости от содержащихся в них полярных групп, по Горловскому, делятся на четыре класса:

- неионогенные (крахмал, оксиэтилцеллюлоза и др.),
- анионные (карбоксиметилцеллюлоза, лигносульфонаты и др.),
- катионные (поливиниламин, хитозан, сополимеры винилпиридина и др.),
- амфотерные (гидролизированный полиакриламид, казеин и другие белки).

#### 4.2 Расчет количества расходуемых реагентов

Расчет количества расходуемых при работе обогатительной фабрики реагентов (собирателя, вспенивателя, флокулянта и т. д.) производится с целью получения необходимых данных для определения экономических показателей.

Удельный расход реагента, подаваемого в операцию, принимается по данным практики, результатам исследований или по сведениям из литературных источников.

Примерные удельные расходы реагентов:

– собирателя (подается в операцию флотации) – 0,8 – 2,0 кг/т;

– вспенивателя (подается в операцию флотации) – 0,02 – 0,12 кг/т;

– флокулянта (подается в операцию сгущения отходов) – 0,02 – 0,06 кг/т.

Для перечистой и контрольной флотации расход реагентов обычно снижается вдвое.

Количество реагента, которое необходимо подать в данную операцию (кг/ч), определим по формуле:

$$X = Q_i \cdot q_i$$

где  $Q_i$  – количество материала, поступающего в операцию, т/ч;  $q_i$  – удельный расход реагента, подаваемого в операцию, кг/т.

Весовое или объемное количество воды, м<sup>3</sup>/ч:

$$B = X \cdot \left( \frac{100}{C} - 1 \right)$$

где  $C$  – концентрация раствора, %

Годовое потребление каждого реагента определяется по формуле:

$$P_i = \frac{k \cdot X \cdot T}{1000}, \text{ т/год,}$$

где  $k$  – коэффициент неравномерность нагрузки;  $T$  – количество машинных часов работы фабрики в году, час.

### **4.3 Расчет вспомогательного оборудования для подготовки и подачи реагентов**

Широкое распространены для кондиционирования пульпы нашли контактные чаны (рис.3). Обычно они представляют собой емкость цилиндрической формы, в которой установлен

вращающийся вал с мешалкой. Контактные чаны выпускаются различных типоразмеров объемом от 0,70 до 100 м<sup>3</sup>. Для работы на грубозернистых и плотных пульпах применяют специальные конструкции контактных чанов.

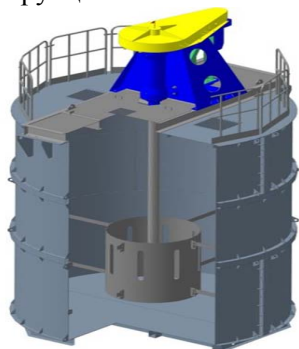


Рис.3. Устройство контактного чана

К таким относятся контактные чаны с установкой пропеллерной мешалки внутри циркуляционной трубы, аппараты для раздельного кондиционирования песков и шламов, контактные чаны с наклонно насаженными на вертикальном валу дисками.

Расчет контактных чанов осуществляется по времени пребывания материала в чане:

$$V_{\text{ч}} = \frac{Q_{\text{об}} \cdot t}{60 \cdot k_{\text{ч}}}, \quad (16)$$

где  $V_{\text{ч}}$ - необходимый объем чана, м<sup>3</sup>;  $Q_{\text{об}}$ - объемный расход пульпы в данную операцию, м<sup>3</sup>/ч;  $t$  – продолжительность кондиционирования, мин;  $k_{\text{ч}}$  – коэффициент заполнения чана (0,8÷0,85).

#### 4.4. Задачи на расчет водно-шламовых схем флотации

Выбрать и рассчитать необходимые флотореагенты и вспомогательное оборудование для разработанной в работе 2 схемы флотации. Производительность по исходной руде и выходы продуктов по каждой схеме приведены в работе 1.



## 5. РАСЧЁТ И ВЫБОР ОБОРУДОВАНИЯ В ЦЕХЕ ФЛОТАЦИИ

### 5.1 Общие сведения об оборудовании в цехе флотации

Для флотации руд цветных металлов наибольшее распространение получили механические (например, ФМ) и пневмомеханические флотационные машины (например, ФПМ). Механические флотационные машины чаще применяются на перемешивающих операциях флотации и в циклах разделения коллективных продуктов, хотя могут рекомендоваться и к установке при сложных схемах флотации, при необходимости подсосов промежуточных продуктов.

В операциях межцикловой, основной и контрольной флотаций на фабриках большой и средней производительности целесообразна установка пневмомеханических машин, ввиду их неоспоримого преимущества по сравнению с механическими флотомашинами.

Расчитывается сводится к определению потребного числа камер флотомашин в каждой операции по формуле:

$$n = \frac{V_n t}{V_k k} \quad (18)$$

где  $n$  – число камер флотомашин в данной операции;  $V_n$  – объём пульпы, поступающей в операцию, м<sup>3</sup>/мин;  $t$  – промышленное время флотации в данной операции (устанавливается согласно работающим базовым предприятиям), мин;  $V_k$  – объём камеры флотомашин, м<sup>3</sup>;  $k$  – коэффициент заполнения камеры, равный отношению полезного объёма камеры к геометрическому.  $k = 0,7-0,85$ . Если время флотации не известно, то можно руководствоваться следующими данными.

Основная флотация:

- природно-гидрофобные минералы – 5–10 мин;
- сульфидные минералы – 10–25 мин;
- окисленные сульфидные минералы – 15–30 мин;
- сульфаты, карбонаты, щелочноземельные металлы – 15–30 мин.

Время контрольной флотации равно (0,7–0,9)  $t_{\text{осн}}$ . Время перечистной флотации принимается для I перечистки (0,5–0,6)  $t_{\text{осн}}$ ; для II перечистки – (0,3–0,4)  $t_{\text{осн}}$  для III перечистки – (0,15–0,25)  $t_{\text{осн}}$  [12].

В приведённой выше формуле не учтено уменьшение расхода пульпы в камеры, обусловленное выходом пульпы в пенные продукты. Тогда, принимая допущение о равномерном выходе пенного продукта по всему фронту флотации, формула для определения числа камер флотомашин примет вид:

$$n = \frac{\left( V_n - \frac{V_{\text{обп}}}{2} \right) t}{V_k k}$$

где  $V_{\text{обп}}$  – объемная производительность по пенному продукту, м<sup>3</sup>/мин.

Объём камеры флотомашин и другие параметры берутся из каталогов производителей данного оборудования. В РФ флотомашин производят: ЗАО «НПО «РИВС» (Санкт-Петербург), ООО «Усольмаш» (Иркутская обл.), ОАО «Машиностроительный завод Труд» (Новосибирск). Из зарубежных фирм стоит отметить: Outokumpu Technology – Outotec (Финляндия), FLSmidth, Metso Minerals AB, Eriez Mineral Flotation Group (Канада), Lipuchina (Китай), Yantai Langchao Machinery Co., Ltd. (Китай), Citic Heavy Machinery Company Ltd. (Китай), Henan Hongji Mine Machinery Co. Ltd. (Китай), Maelgwyn Mineral Services Ltd. (Великобритания), Zhengzhou Zhongding Heavy Duty Machine Manufacturing Co., Ltd. (Китай), ООО «Луганский завод «Полимер», «Луганский машиностроительный завод им. Пархоменко» и др. В приложении 4 представлены технические характеристики и габаритные размеры флотомашин некоторых фирм производителей.

Если в результате расчета к установке могут быть приняты несколько типов флотомашин, то проводится технико-экономическое сравнение вариантов с установкой машин разного типоразмера и выбирается оптимальный вариант.

При выборе и расчете флотомашин следует помнить следующие правила:

– количество камер для механических и пневмомеханических флотомашин в операциях основной и контрольной флотаций должно быть не менее 4;

– число параллельно работающих машин следует выбирать такими, чтобы минутный дебит пульпы, поступающей в отдельные машины, находился в пределах  $(1,2 \div 2)V_K$  для механических машин и  $(2 \div 3)V_K$  для пневмомеханических машин;

– оптимальный объём флотомашин для основной и контрольной флотаций может быть определен, исходя из времени пребывания пульпы в одной камере не более 0,5 мин (к перечистным операциям это условие не относится);

– округление количества камер флотомашин следует производить в большую сторону, при этом следует обращать внимание на конструктивные особенности выбранной к установке машины (некоторые модели имеют только четное количество камер).

В случае необходимости в данном разделе приводится расчет и выбор необходимого количества вспомогательного оборудования в флотационном отделении (контактные чаны, насосы).

Контактные чаны устанавливаются при необходимости длительного перемешивания пульпы с реагентами, её аэрации или кондиционирования перед флотацией устанавливают контактные чаны. Вместимость чана в м<sup>3</sup> рассчитывается:

$$V_{\text{ч}} = \frac{Q \left( R + \frac{1}{R} \right) t}{1440}$$

Продолжительность контакта  $t$  (мин) определяется временем взаимодействия флотационных реагентов с поверхностью минералов для пульп оно составляет 1–4 мин, для рудных пульп может варьироваться от 1 до 60 мин, но преимущественно находится в пределах 1–6 мин [12]. Технические характеристики чанов приведены в приложении 5. Иногда на обогатительных фабриках вместо контактных чанов используют первые камеры флотомашин. В этом случае с них убирают пеногоны и перекрывается подача

воздуха. Расчёт необходимого объёма камер для агитации производится аналогично расчёту объёма контактного чана [12].

Для подачи реагентов в процесс флотации используют питатели реагентов. Конструкция питателя зависит от физических свойств применяемого реагента, чаще всего подаваемого в пульпу в жидком виде и реже – в твёрдом. Значения концентраций растворов и эмульсий флотореагентов принимаются по данным работы предприятия аналога или берутся по табличным данным, которые приведены в [4, 6, 13]. Исходя из концентрации раствора реагента, а также зная его расход в г/т необходимо определить объем реагентов, подаваемый в операции, и выбрать соответствующие питатели. Питатели выбираются по данным каталогов производителей, либо в соответствующей литературе. Сводные данные выбора и расчёта питателей флотационных реагентов помещают в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Пример оформления расчета питателей

Реагент	Точка подачи	Концентрация раствора или эмульсии, %	Расход		Тип питателя	Количество питателей
			г/т	см <sup>3</sup> /мин		
Ксантогенат	Основная медная флотация	5,0	50	2100	ПРИ-4	1

## 5.2. Задачи на расчёт и выбор оборудования

Выбрать и рассчитать необходимое количество флотомашин и питателей реагентов для разработанной в работе 2 схемы флотации. Производительность по исходной руде и выходы продуктов по каждой схеме приведены в работе 1.

При расчете следует помнить, что для окончательного выбора стоит рассмотреть несколько флотомашин различных производителей, а так же произвести анализ их технических характеристик.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1) Абрамов, А.А. Флотационные методы обогащения [Электронный ресурс] : учеб. — Электрон. дан. — Москва: Горная

книга, 2008. — 711 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/3269>. — Загл. с экрана

2) Александрова Т.Н. Флотационные методы обогащения. Методические указания к лабораторным работам. – Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», СПб, 2013;

3) Абрамов, А.А. Флотационные методы обогащения: Учебник [Электронный ресурс] : учеб. — Электрон. дан. — Москва : Горная книга, 2016. — 595 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/74374>. — Загл. с экрана.

4) Александрова Т.Н., Кусков В.Б., Львов В.В., Николаева Н.В. Обогащение полезных ископаемых. Учебник. РИЦ Национального минерально-сырьевого университета «Горный», Заказ 503. С 144 (ISBN 978-5-94211-731-3), 2015, 530 с.

5) Абрамов, А.А. Технология переработки и обогащения руд цветных металлов: Учебное пособие в 2 кн. Т.3. Книга 1. Рудоподготовка и Cu, Cu-Py, Cu-Fe, Mo, Cu-Mo, Cu-Zn руды [Электронный ресурс] : учеб. пособие — Электрон. дан. — Москва : Горная книга, 2005. — 575 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/3267>. — Загл. с экр

6) Абрамов, А.А. Технология переработки и обогащения руд цветных металлов: Учебное пособие в 2 кн. Т.3. Книга 2. Pb, Pb-Cu, Zn, Pb-Zn, Pb-Cu-Zn, Cu-Ni, Co-, Bi-, Sb-, Hg- содержащие руды [Электронный ресурс] : учеб. пособие — Электрон. дан. — Москва : Горная книга, 2005. — 470 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/3268>. — Загл. с экрана.

7) Николаев, А.А. Физико-химические методы исследований флотационных систем [Электронный ресурс] : учеб. пособие — Электрон. дан. — Москва : МИСИС, 2013. — 73 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/47432>. — Загл. с экрана

8) Сорокин, М.М. Флотационные методы обогащения. Химические основы флотации [Электронный ресурс] : учеб. пособие — Электрон. дан. — Москва : МИСИС, 2011. — 411 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/2073>. — Загл. с экрана.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	3
1. РАСЧЁТ БАЛАНСА СХЕМЫ ФЛОТАЦИОННОГО ОБОГАЩЕНИЯ.....	3
1.1. Теоретическая информация.....	3
1.2. Задания на расчет баланса схемы флотационного обогащения.....	7
2. РАСЧЕТ КАЧЕСТВЕННО-КОЛИЧЕСТВЕННЫХ СХЕМ ФЛОТАЦИИ	13
2.1. Теоретическая информация.....	13
2.2. Задания на расчет качественно-количественных схем флотации .....	15
3. РАСЧЕТ ВОДНО-ШЛАМОВЫХ СХЕМ ФЛОТАЦИИ.....	16
3.1. Теоретическая информация.....	16
3.2. Задачи на расчет водно-шламовых схем флотации .....	18
4. РАСЧЕТ НЕОБХОДИМОГО КОЛИЧЕСТВА РЕАГЕНТОВ .....	19
4.1 Общие сведения о флотационных реагентах .....	19
4.1.1 Собиратели.....	20
4.1.2 Пенообразователи .....	21
4.1.3 Регуляторы среды.....	21
4.1.4 Активаторы .....	21
4.1.5 Депрессоры .....	22
4.2 Расчет количества расходуемых реагентов .....	22
4.3 Расчет вспомогательного оборудования для подготовки и подачи реагентов .....	23
4.4. Задачи на расчет водно-шламовых схем флотации .....	24
5. РАСЧЁТ И ВЫБОР ОБОРУДОВАНИЯ В ЦЕХЕ ФЛОТАЦИИ .....	25
5.1 Общие сведения об оборудовании в цехе флотации .....	25
5.2. Задачи на расчёт и выбор оборудования .....	28
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	28

# **ФЛОТАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ОБОГАЩЕНИЯ**

*Методические указания к практическим занятиям  
для студентов специальности 21.05.04*

Сост.: *Т.Н. Александрова, А.О. Ромашев*

Печатается с оригинал-макета, подготовленного кафедрой  
обогащения полезных ископаемых

Ответственный за выпуск *Т.Н. Александрова*

Лицензия ИД № 06517 от 09.01.2002

Подписано к печати 21.05.2019. Формат 60×84/16.

Усл. печ. л. 1,7. Усл.кр.-отт. 1,7. Уч.-изд.л. 1,5. Тираж 60 экз. Заказ 474. С 176.

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