

# РУДОПОДГОТОВКА И ОБОГАЩЕНИЕ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

---

УДК 622.755

DOI: 10.21440/0536-1028-2018-1-78-89

## ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ И РАСЧЕТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЗАМКНУТОГО ЦИКЛА МОКРОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ МАГНЕТИТОВЫХ РУД

БРАГИН В. Г., ВОЛКОВ Е. Б.

*Основным классифицирующим оборудованием, используемым в настоящее время в измельчительных отделениях обогатительных фабрик, являются гидроциклоны. Выбор конструктивных и режимных параметров этих аппаратов, обеспечивающих получение сливного продукта заданной крупности при минимальной циркуляции, – одна из актуальных задач повышения эффективности работы замкнутых циклов мокрого измельчения. В данной работе предложена методика выбора конструктивных параметров гидроциклонов и нагрузки по исходной руде на мельницу по заданной крупности сливного продукта. В результате получен единый комплекс уравнений, описывающих процесс измельчения в мельнице и классификации в гидроциклонах в условиях замкнутого цикла. Предложенная методика расчета крупности продуктов классификации дает возможность определения конструктивных параметров гидроциклонов по заданной крупности сливного продукта при изменении нагрузки по исходной руде при заданных параметрах классификации. Предложенная модель замкнутого цикла мокрого измельчения может быть широко использована при проектировании обогатительных фабрик, прогнозировании технологических параметров классификации при замене оборудования и для решения задач управления замкнутым циклом мокрого измельчения.*

**Ключевые слова:** классифицирующее оборудование; магнетитовые руды; гидроциклоны; замкнутый цикл; измельчение; мельница; конструктивные параметры гидроциклонов; режимные параметры гидроциклонов.

Теоретическими и практическими расчетами параметров оборудования и технологии работы замкнутых циклов измельчения, включающих шаровую мельницу и гидроциклоны, занимались многие отечественные и зарубежные ученые и научно-исследовательские и проектные организации. Наиболее значительные результаты в исследовании процессов измельчения и в моделировании работы мельниц получены А. Дж. Линчем, Бродментом и Калкоттом [1]. Исследования работы гидроциклонов и обзор результатов многих авторов изложены в книге А. И. Поварова [2].

Формулы для расчета производительности гидроциклонов получены при рассмотрении гидроциклона как гидравлического сопротивления на питающем трубопроводе. Наибольшее практическое применение получили формулы Поварова–Щербакова [3]. Известные формулы, связывающие производительность по песковому и сливному продуктам, плохо согласуются с практической производительностью [2]. Наибольший интерес представляет результат П. И. Пилова [4].

---

**Брагин Валерий Григорьевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры технической механики. 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, Уральский государственный горный университет.

**Волков Евгений Борисович** – кандидат технических наук, доцент кафедры технической механики. 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, Уральский государственный горный университет. E-mail: evgeniy.volkov.ursmu@yandex.ru

Реальные результаты моделирования процессов разделения в гидроциклонах получены Шубертом, Т. Нейсе и П. И. Пиловым на основе турбулентной модели [5, 6]. Расчетами извлечений узких классов крупности в продукты классификации занимались В. А. Рундквист, П. Фальстром, Тхуан Фан Ван [7–10].

Хорошо изученным с помощью экспериментальных исследований является влияние конструктивных и режимных параметров работы гидроциклонов на показатели классификации [8, 11, 12]. Полученные результаты, к сожалению, не дают ключи для однозначного выбора конструктивных и режимных параметров гидроциклонов по заданной крупности сливного продукта, так как не учитывают влияния содержания твердого и гранулометрического состава исходной смеси.

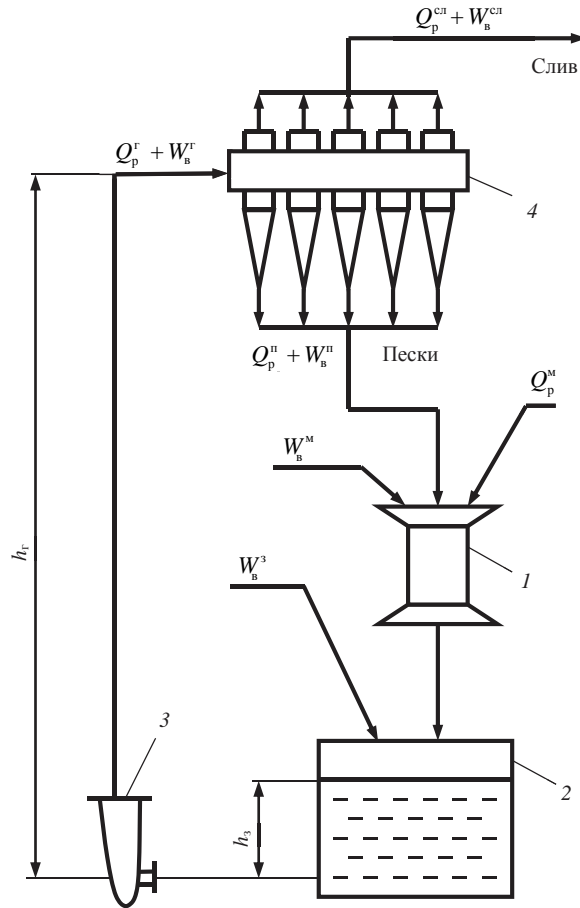


Рис. 1. Схема потоков в замкнутом цикле мокрого измельчения:

1 – мельница; 2 – зумпф; 3 – насос; 4 – батарея из гидроциклонов

Следует отметить, что для гидроциклонов малого диаметра такая задача частично решена в другой постановке группой авторов в Московском институте химического машиностроения [13]. В предлагаемой работе путем исследования модели процесса решена задача выбора конструктивных и режимных параметров классификации при известной крупности исходной смеси при ограничении на крупность сливного продукта.

Замкнутый цикл мокрого измельчения включает шаровую мельницу, зумпф насоса, насос, напорный пульпопровод, батарею из  $n$  гидроциклонов и транспортные пульпопроводы (рис. 1).

Введем следующие обозначения:  $Q_p^M$  – нагрузка на мельницу по исходной руде, т/ч;  $Q_p^r$  – нагрузка на гидроциклоны по руде, т/ч;  $Q_p^{cl}$  – производительность по руде в сливе гидроциклонов, т/ч;  $Q_p^n$  – производительность по руде в песках гидроциклонов, т/ч;  $W_B^M$  – расход воды в мельницу, м<sup>3</sup>/ч;  $W_B^3$  – расход воды в зумпф насоса, м<sup>3</sup>/ч;  $W_B^r$  – расход воды в гидроциклоны, м<sup>3</sup>/ч;  $W_B^{cl}$  – расход воды со сливом гидроциклонов, м<sup>3</sup>/ч;  $W_B^n$  – расход воды с песковым продуктом, м<sup>3</sup>/ч;  $W$  – объемная производительность насоса (батареи гидроциклонов), м<sup>3</sup>/ч;  $\rho_r, \rho_B$  – плотности твердого и воды, т/м<sup>3</sup>;  $\rho$  – плотность питания гидроциклонов, т/м<sup>3</sup>.

Исходя из баланса руды и воды, для замкнутого цикла мокрого измельчения (рис. 1) верны следующие уравнения:

$$Q_p^{cl} = Q_p^M;$$

$$Q_p^r = Q_p^{cl} + Q_p^n = Q_p^M + Q_p^n; \quad (1)$$

$$W_B^{cl} = W_B^M + W_B^3;$$

$$W_B^r = W_B^{cl} + W_B^n = W_B^M + W_B^3 + W_B^n; \quad (2)$$

$$W = \frac{Q_p^r}{\rho_r} + W_B^r; \quad (3)$$

$$\rho = \frac{Q_p^r}{W} + \frac{\rho_B W_B^r}{W}. \quad (4)$$

Для стабильной работы замкнутого цикла измельчения расход воды в зумпф насоса  $W_B^3$  должен быть определен исходя из производительности насоса  $W$  при условии поддержания постоянного уровня в зумпфе, соответствующего заданному. Используемые в настоящее время на обогатительных фабриках страны автоматические системы регулировки уровня зумпфа надежно обеспечивают заданный уровень, т. е. стабильную работу насоса, подающего питание в гидроциклоны.

Насос и напорный пульпопровод вместе с зумпфом и батареей гидроциклонов образуют насосную установку, в которой подача  $W$  и напор насоса  $H$  должны соответствовать характеристике внешней сети, образуемой зумпфом, пульпопроводом и батареей гидроциклонов.

Характеристика насоса может быть представлена в виде [14]:

$$H = A + BW - CW^2, \quad (5)$$

где  $H$  – напор насоса, м;  $A, B, C$  – коэффициенты, определяемые экспериментально;

$$H_c = h_r - h_3 + K_1 W^2 + P/\rho g, \quad (6)$$

где  $H_c$  – сопротивление сети, м;  $h_r$  – расстояние по вертикали от оси всасывающего патрубка насоса до оси питающих патрубков гидроциклонов, м;  $h_3$  – уровень пульпы в зумпфе насоса, м;  $K_1$  – коэффициент пульповода от насоса до гидроциклона, характеризующий потери напора на этом участке, м;  $P$  – давление на входе в гидроциклоны, или гидравлическое сопротивление батареи гидроциклонов, кПа;  $\rho$  – плотность пульпы, т/м<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

При работе насоса на сеть его напор  $H$  должен быть равен сопротивлению сети  $H_c$  [14]:

$$H = H_c. \quad (7)$$

Или, с учетом (5) и (6), получим уравнение:

$$A + BW^2 - CW^2 = h_r - h_3 + K_1W^2 + P/\rho g. \quad (8)$$

Производительность батареи гидроциклонов может быть найдена по формуле Поварова–Щербакова [2]:

$$W = K_2 K_D K_a n d_c d_3 \sqrt{P}, \quad (9)$$

где  $K_2$  – эмпирический коэффициент;  $K_D$ ,  $K_a$  – коэффициенты, учитывающие диаметр гидроциклонов и угол конуса;  $n$  – количество гидроциклонов в батарее;  $d_c$ ,  $d_3$  – диаметры сливного и входного патрубков гидроциклонов, см;  $P$  – давление на входе в гидроциклоны, кПа.

Решая уравнение (9) относительно  $P$  и обозначив  $b$  величину, которая может быть определена по формуле  $b = K_1(K_2 K_D K_a n d_c d_3)^2$ , найдем

$$P = W^2 K_1 / b. \quad (10)$$

Подставляя (10) в (8), получим:

$$A + BW - CW^2 = h_r - h_3 + K_1W^2 + K_1W^2/b\rho g. \quad (11)$$

Из (11) легко найти плотность пульпы

$$\rho = K_1W^2 / \left[ bg \left( A + BW - CW^2 - h_r + h_3 - K_1W^2 \right) \right]. \quad (12)$$

Тогда задача определения плотности пульпы  $\rho$  и производительности насоса  $W$  при заданных значения  $Q_p^r$ ,  $h_3$  и известных  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $h_r$ ,  $K_1$ ,  $b$  решается методом итераций по следующей схеме.

Задаем начальное значение  $\rho_0$ . По формуле (4) находим начальную производительность насоса, м<sup>3</sup>/ч:

$$W_0 = Q_p^r / \rho_0 + \rho_b W_b^r / \rho_0.$$

Подставляя  $W_0$  в (12), находим  $\rho_1$ . Если  $\rho_1 = \rho_0$ , то  $W = W_0$ , и задача решена. Если  $\rho_1 \neq \rho_0$ , то снова по формуле (4) находим  $W_1$ , а по (12) –  $\rho_2$ . Повторяя такую процедуру  $k$  раз, добиваемся с заданной точностью равенства

$$\rho_{k+1} \approx \rho_k = \rho, \quad (13)$$

тогда

$$W = W_k. \quad (14)$$

Здесь индексы переменных  $\rho$  и  $W$  означают номер шага итерации.

Из (3) и (2) найдем

$$W_B^r = W - Q_p^r / \rho_r; \quad (15)$$

$$W_B^3 = W_B^r - W_B^n - W_B^m.$$

Определенные таким образом,  $\rho$ ,  $W$ ,  $W_B^r$  и  $W_B^3$  обеспечивают выполнение условия (7) и сохранение заданного уровня зумпфа  $h_3$ .

В основу модели процесса классификации в гидроциклонах положен следующий комплекс уравнений [15]:

$$\varepsilon(\tilde{\delta}_i) = \frac{1 - \exp\left\{K_3 A_3 \eta \left[ \left( \tilde{\delta}_i / \delta_{50} \right)^m - K_4 \right]\right\}}{1 - \exp\left\{K_3 A_3 \left[ \left( \tilde{\delta}_i / \delta_{50} \right)^m - K_4 \right]\right\}}; \quad (16)$$

$$\delta_{50} = K_5 K_D K_\alpha (d_c / d_n)^{b_1} (d_3 / D)^{a_2} (1 - \beta)^{a_3} [\mu D / (\rho - \rho_b)]^{0.5} (\rho / P)^{0.25}; \quad (17)$$

$$A_3 = (d_c / d_n)^{b_2} (1 - \beta)^{b_3} / [\eta \text{ctg}(\alpha / 2)]; \quad (18)$$

$$\eta = 1 / \left[ 1 + K_6 K_D K_\alpha (d_c / d_n)^{c_1} (d_3 / D)^{c_2} (1 - \beta)^{c_3} (1 - P_c / P)^{0.5} \right], \quad (19)$$

где  $\varepsilon(\tilde{\delta}_i)$  – фракционные извлечения частиц среднего размера в пески, отн. ед.;  $\eta$  – объемный выход песков, отн. ед.;  $\delta_{50}$  – размер граничного зерна, мкм;  $d_c$ ,  $d_n$ ,  $d_3$  – диаметры сливной, песковой и питающей насадок, см;  $D$  – диаметр гидроциклонов, см;  $K_3$ ,  $K_4$ ,  $K_5$ ,  $K_6$  – эмпирические коэффициенты, определяемые экспериментально;  $A_3$  – безразмерный коэффициент, учитывающий влияние режимных и конструктивных параметров гидроциклонов;  $\beta$  – относительная объемная концентрация твердого в питании гидроциклонов, отн. ед.;  $\alpha$  – угол конуса гидроциклонов, град.;  $\mu$  – динамическая вязкость пульпы, подаваемой насосом в гидроциклоны, кПа · с;  $P$  – давление на входе в гидроциклоны, кПа, находится по формуле (10);  $P_c$  – потери давления в сливном тракте, кПа;  $\tilde{\delta}_i$  – средний размер  $i$ -го интервала крупности, мкм.

Относительная объемная концентрация твердого в питании гидроциклонов  $\beta$  и динамическая вязкость  $\mu$  могут быть определены по следующим формулам:

$$\beta = (\rho - \rho_b) / (\rho_r - \rho_b); \quad \mu = \mu_0 (1 + 2,5\beta + 14,1\beta^2),$$

где  $\mu_0$  – динамическая вязкость воды, кПа · с;  $\rho$  – плотность пульпы, подаваемой в гидроциклоны, т/м<sup>3</sup>, находится по формуле (13).

На основе экспериментальных данных для магнетитовых руд Соколовско-Сарбайского месторождения методом наименьших квадратов найдены следующие эмпирические коэффициенты и показатели степеней:  $K_3 = -4,65$ ;  $K_4 = 0,25$ ;  $K_5 = 3,428$ ;  $m = 1,3$ ;  $a_1 = 1,21$ ;  $a_2 = 0,14$ ;  $a_3 = 0,08$ ;  $b_1 = 0,25$ ;  $b_3 = 1,1$ ;  $K_6 = 2,777$ ;  $c_1 = 1,26$ ;  $c_2 = 0,06$ ;  $c_3 = 2,74$ .

При сопоставлении расчетных данных с опытными использование формул (16), (17), (18) дает среднюю относительную ошибку соответственно 4,2; 9,4 и 11,6 %.

Технологические показатели процесса классификации в гидроциклонах – выход слива, гранулометрический состав слива и песков – будут зависеть от крупности питания гидроциклонов и определяются по следующим формулам:

$$\gamma = \sum_{i=1}^n (1 - \varepsilon_i) q_i^r; \quad (20)$$

$$q_i^c = 100(1 - \varepsilon_i) q_i^r / (100 - \gamma);$$

$$q_i^n = 100\varepsilon_i q_i^r / (100 - \gamma), \quad (21)$$

где  $\gamma$  – выход слива, %;  $q_i^n$  – гранулометрический состав песков, %;  $q_i^c$  – гранулометрический состав слива, %;  $i$  – порядковый номер интервала крупности;  $n$  – количество интервалов крупности.

За основу модели процесса измельчения в мельнице примем матричную модель [1, 16]. Введем следующие обозначения:  $V_m$  – объем мельницы, м<sup>3</sup>;  $\varphi_0$  – коэффициент заполнения, отн. ед.;  $t_m$  – среднее время пребывания руды в мельнице, с;  $\delta_i$  – размеры границ интервалов классов крупности, мм;  $\tilde{\delta}_i$  – средние размеры интервалов классов крупности, мм;  $i, j$  – порядковый номер интервала класса крупности, начиная с максимального;  $n$  – количество интервалов крупности;  $P_{ij}$  – доля руды  $j$ -го интервала крупности, оставшейся нераздробленной за время пребывания в мельнице, отн. ед.;  $P$  – диагональная матрица с элементами  $P_{ij}$ ;  $\Phi_{ij}$  – доля руды в  $j$ -м интервале классов крупности, измельченной за время пребывания в мельнице до размеров меньше, чем  $\delta_i$ , отн. ед.;  $f_{ij}$  – доля руды в  $j$ -м интервале классов крупности, перешедшей в результате измельчения в  $i$ -й интервал, отн. ед.;  $F$  – треугольная матрица с элементами  $f_{ij}$ ;  $G$  – треугольная матрица-оператор, преобразующая матрицу гранулометрического состава питания мельницы в матрицу гранулометрического состава слива мельницы;  $g_{ij}$  – элемент матрицы  $G$ ;  $c_j$  – параметр уравнений модели для  $j$ -го интервала классов крупности;  $I$  – единичная диагональная матрица размером  $n \times n$ ;  $q_i^n$  – гранулометрический состав питания мельницы, %;  $q^n$  – матрица-столбец с элементами  $q_i^n$ ;  $q_i^r$  – гранулометрический состав слива мельницы или питания гидроциклонов, %;  $q^r$  – матрица-столбец с элементами  $q_i^r$ ;  $q_j^m$  – гранулометрический состав исходной руды, подаваемой в замкнутый цикл, %;  $q_j^n$  – гранулометрический состав песков гидроциклонов, %.

Средний размер  $i$ -го интервала классов крупности может быть найден по формуле:

$$\tilde{\delta}_i = (\delta_i + \delta_{i+1}) / 2 \quad \text{при } i = 1, 2, \dots, n.$$

За время пребывания руды в мельнице примем величину

$$t_m = (3600V_m\varphi_0) / [(Q_p^m + Q_p^n) / \rho_r + W_b^n + W_b^m]. \quad (22)$$

Если для данной мельницы известны элементы матрицы преобразования  $g_{ij}$ , то матричное уравнение, описывающее процесс измельчения, будет иметь вид:

$$q^r = Gq^n. \quad (23)$$

Матрица  $G$  может быть определена в виде:

$$G = F(I - P) + P. \quad (24)$$

Элементы матрицы  $P$  и  $F$  предполагается искать по следующим формулам [1, 16]:

$$P_{ij} = \exp\left[-c_j \left(\tilde{\delta}_j / \delta_j\right)^r\right], \quad (25)$$

где

$$c_j = K_7 t_m \delta_i. \quad (26)$$

В формуле (26) коэффициент  $K_7$  и показатель степени  $r$  могут быть определены экспериментально. Например, величина  $r$  может быть принята равной 0,03, а коэффициент  $K_7 = 0,0086$ , что соответствует условиям измельчения магнетитовых руд в шаровых мельницах.

Если принять за  $\Phi_{ij}$  следующие величины

$$\Phi_{ij} = \frac{1 - \exp\left[(-c_j x_{ij})(1 + c_j x_{ij} - c_j x_{ij}^2)\right]}{1 - \exp(-c_j)} \quad \text{при } j = 1, 2, \dots, n; \quad (27)$$

$$\Phi_{ij} = 0 \quad \text{при } i < j,$$

$$x_{ij} = \left(\tilde{\delta}_j / \delta_j\right)^r \quad \text{при } j = 1, 2, \dots, n; i = j, \dots, n, \quad (28)$$

то элементы матрицы  $F$  найдутся по формулам:

$$f_{ij} = \Phi_{ij} - \Phi_{i+1,j} \quad \text{при } \begin{cases} j = 1, \dots, n; \\ i = j, \dots, n-1, \end{cases} \quad (29)$$

$$f_{n,j} = 1 - \sum_{i=j}^{n-1} f_{i,j} \quad \text{при } j = 1, 2, \dots, n.$$

С учетом (26)–(29) элементы матрицы преобразования  $G$  легко найти из (24):

$$\begin{aligned} g_{ij} &= f_{ij} (1 - P_{ij}) + P_{ij}, & \text{если } i = j; \\ g_{ij} &= f_{ij} (1 - P_{ij}), & \text{если } i > j; \\ g_{ij} &= 0, & \text{если } i < j \end{aligned} \quad (30)$$

для всех значений  $j = 1, 2, \dots, n; i = j, \dots, n$ .

Гранулометрический состав питания мельницы может быть определен исходя из баланса руды:

$$q_i^n = \frac{q_i^m Q_p^m + q_i^n Q_p^n}{Q_p^m + Q_p^n}. \quad (31)$$

Тогда уравнение (23) будет описывать процесс измельчения в мельнице.

В качестве примера приведены результаты расчета крупности измельчения магнетитовых руд в мельнице МШЦ 3600 × 4500 (табл. 1). Расчеты выполнены для следующих параметров работы мельницы:  $V_m = 58 \text{ м}^3$ ;  $n_m = 18 \text{ об./мин}$ ;  $\varphi = 0,108$ . Показатель степени  $m = 0,03$ .

Анализ данных табл. 1 позволяет сделать следующие выводы.

При увеличении нагрузки по исходной руде с учетом расхода воды с 323 до 492 т/ч время пребывания материала в мельнице уменьшается со 100 до 59 с.

При колебании содержания класса –74 мкм в питании мельницы с 13,1 до 19,4 % среднее квадратичное отклонение расчетных значений этого класса крупности в сливе мельницы от опытных не превосходит 0,82 % и составляет в среднем 0,55 %. Это позволяет утверждать, что предложенные уравнения модели хорошо описывают данный процесс.

Задача расчета крупности продуктов классификации формулируется следующим образом: по заданным значениям  $Q_p^m$ ,  $W_b^m$ ,  $q_j^m$ ,  $h_3$  и известным величинам  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $K_1$ ,  $K_2, \dots, K_7$ ,  $m$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$ ,  $b_1$ ,  $b_3$ ,  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $c_3$ ,  $r$ ,  $\delta_r$ ,  $P_c$ ,  $\rho_r$ ,  $\rho_b$ ,  $h_p$ ,  $D$ ,  $d_c$ ,  $d_n$ ,  $d_3$ ,  $\alpha$ ,  $\Phi_0$ ,  $V_m$  определить плотность питания гидроциклонов  $\rho$ , подачу насоса  $W$ , найти гранулометрический состав слива  $q_i^c$  и содержание твердого в сливе  $T_c$ . Поставленная задача решается методом итераций в следующей последовательности. По заданным значениям  $Q_p^m$  и  $W_b^m$  по формуле (22) найдем  $t_m$ , приняв  $Q_p^n = 0$ ,  $W_b^n = 0$ . По формулам (25)–(30) определим элементы матрицы преобразования  $G$  и по формуле (23) найдем гранулометрический состав питания гидроциклонов для первого шага итерации.

Далее, приняв  $Q_p^r = Q_p^m$  по формулам (13) и (14) находим значения  $W$  и  $\rho$ , а по формуле (15) –  $W_b^r$ . Используя уравнения модели процесса классификации в гидроциклонах (16)–(19), вычисляем  $\varepsilon(\delta_i)$ , затем по формуле (20) определяем выход слива  $\gamma$ .

Тогда

$$Q_p^c = \gamma Q_p^r / 100.$$

По формуле (21) определим гранулометрический состав песков гидроциклонов и найдем производительность по руде в песках гидроциклонов:

$$Q_p^n = (1 - \gamma) Q_p^r.$$

Далее следует второй шаг итерационной процедуры. По формуле (31) с учетом найденного гранулометрического состава песков и  $Q_p^n$  определим гранулометрический состав питания мельницы и, следуя указаниям первого шага итерации, снова найдем гранулометрический состав питания гидроциклонов. Итерационную процедуру следует выполнять до тех пор, пока не будет реализовано условие формулы (1).

Для каждого значения переменных  $d_c/d_n$  и  $d_3/D$  из области их изменения по методике, приведенной ранее, можно рассчитать гранулометрический состав слива гидроциклонов при заданных: нагрузке по руде и воде на мельницу  $Q_p^m$ ,  $W_b^m$  и гранулометрическому составу руды, подаваемой в замкнутый цикл,  $q_j^m$  для различных значений давления на входе.

Результаты расчетов легко представить в виде графиков зависимостей содержания определенного класса крупности в сливе гидроциклонов от переменных  $d_c/d_n$ ,  $d_3/D$  и от других режимных параметров процесса.

Зададим ограничение на крупность сливного продукта по некоторому классу:

$$q_{\delta_j}^c = 100 - \sum_{i=1}^j q_i^c = q^* \quad (32)$$

По построенным графикам найдем точки пересечения каждой кривой  $d_c/d_n$  с горизонтальной прямой  $q_{\delta_j}^c = q^*$  при  $d_3 \in [d_3^1, d_3^2]$ . Через эти точки проведем вер-



*Таблица 1*  
**Сравнение опытных и расчетных данных granulометрического состава слива шаровых мельниц при измельчении магнетитовых руд Соколовско-Сарбайского месторождения**

Продукт	Нагрузка по руде, т/ч	Нагрузка по воде, т/ч	Время пребывания руды в мельнице, с	Granulометрический состав, %								Среднеквадратичное отклонение, %
				+2,0	1,0	0,5	0,2	0,1	0,074	0,04	-0,04	
Питание				1,4	4,0	4,5	12,3	34,6	18,8	11,4	13,0	
Слив (опытные данные)	302	144	91	-	0,6	1,6	12,6	27,0	15,5	14,8	27,9	0,82
Слив (расчетные данные)				-	1,0	2,3	8,9	30,4	17,7	11,3	28,4	
Питание				1,1	3,6	5,7	4,8	26,9	13,1	27,5	17,3	
Слив (опытные данные)	323	120	100	-	0,9	1,9	3,1	25,1	11,8	28,0	29,2	0,3
Слив (расчетные данные)				-	1,0	3,0	3,7	23,9	12,4	26,5	29,5	
Питание				0,2	1,6	4,1	14,6	32,3	19,4	13,7	14,1	
Слив (опытные данные)	326	145	87,7	-	-	1,6	7,2	30,9	17,2	16,1	27,0	0,64
Слив (расчетные данные)				-	0,4	2,1	10,5	28,5	18,2	13,4	26,9	
Питание				0,1	2,1	4,3	13,6	29,9	19,1	17,7	13,2	
Слив (опытные данные)	414	199	65,8	-	0,5	2,0	9,0	30,6	17,0	19,2	21,7	0,55
Слив (расчетные данные)				-	0,9	2,8	11,1	27,6	18,3	17,4	21,9	
Питание				0,4	3,0	5,2	12,4	27,5	16,6	22,5	12,4	
Слив (опытные данные)	492	212	59,2	-	0,6	2,6	11,8	24,0	18,0	20,6	23,0	0,43
Слив (расчетные данные)				-	1,1	3,2	9,8	25,1	15,9	21,9	23,0	

тикальные линии и определим точки пересечения этих линий с горизонтальной осью  $d_c/d_n$ . Полученные значения  $d_c/d_n$  и являются решением задачи определения конструктивных параметров  $d_c$  и  $d_n$  при фиксированном значении  $d_3$ .

В качестве примера использования графиков зависимости крупности слива от переменных  $d_c/d_n$  и  $d_3/D$  для технологического расчета гидроциклонов ГЦ-50 в условиях фабрики ММС Соколовско-Сарбайского горно-обогатительного комбината зададим крупность слива по классу 74 мкм, необходимую по требованиям технологии процесса мокрого магнитного обогащения для раскрытия зерен магнетита:  $q_{-74}^c = 95\%$ .

Таблица 2

**Значения  $q_{-44}^c$  и  $E$  при заданной крупности слива  $q_{-74}^c = 95\%$  для гидроциклона ГЦ-50 при следующем гранулометрическом составе питания**

T, %	P, кПа	Размеры питающих насадок, мм								
		40 × 140			60 × 140			84 × 140		
		$d_c/d_n$	$q_{-44}^c$	E, %	$d_c/d_n$	$q_{-44}^c$	E, %	$d_c/d_n$	$q_{-44}^c$	E, %
20,3	100	2,18	82,10	44,60	2,16	81,20	42,50	2,10	81,50	44,70
	150	2,48	81,10	46,60	2,40	81,30	46,40	2,35	81,30	46,20
	200	2,68	81,00	47,50	2,58	81,30	47,10	2,51	81,50	46,80
	250	–	–	–	2,73	81,50	47,40	2,67	81,30	47,30
28,3	100	2,03	80,60	44,20	1,96	81,00	43,40	1,91	81,10	43,60
	150	2,23	81,10	44,90	2,17	81,00	44,80	2,10	81,60	44,10
	200	2,40	81,20	45,70	2,35	81,30	45,20	2,28	81,20	44,80
	250	2,55	81,20	46,30	2,49	81,00	46,20	2,42	81,10	46,00
35,3	100	1,81	81,20	41,20	1,76	81,00	41,20	1,71	81,30	41,00
	150	2,03	81,00	43,00	1,96	80,80	43,00	1,93	80,30	42,60
	200	2,18	81,30	43,60	2,12	81,10	43,60	2,07	81,00	43,40
	250	2,31	81,20	44,00	2,25	81,10	44,20	2,18	81,30	44,00
41,4	100	1,61	81,10	39,00	1,56	81,10	38,80	1,53	81,00	38,40
	150	1,80	80,80	40,80	1,74	81,30	40,00	1,70	81,00	40,00
	200	1,94	80,80	42,00	1,90	80,90	41,80	1,83	81,00	40,80
	250	2,05	81,10	42,40	2,02	80,90	42,40	1,96	80,80	42,20
46,8	100	1,44	80,40	36,60	–	–	–	–	–	–
	150	1,61	80,80	38,00	1,57	80,50	38,20	1,53	80,40	37,60
	200	1,73	80,90	39,00	1,67	80,80	38,60	1,65	80,70	38,80
	250	1,84	81,00	40,00	1,79	80,50	40,00	1,74	80,90	39,40

Точки пересечения кривых  $d_c/d_n$  с горизонталью  $q_{-74}^c = 95\%$  при трех значениях  $d_3/D$ , соответствующих ширине питающей насадки 40, 60 и 84 мм, для четырех значений давления  $P$  на входе в гидроциклон, для разных значений весового содержания твердого  $T$  в питании гидроциклонов приведены в табл. 2.

Размер частиц, мкм	–44	44–74	74–100	100–200	+200
Выход классов, %	23,2	16,1	20,6	32,1	8,0

Кроме того, в таблице приведены расчетные значения содержания класса –44 мкм в сливе и эффективности классификации по Хэнкоку–Луйкену  $E$  для всех значений переменных, указанных ранее.

Анализ графиков и результатов расчетов, приведенных в табл. 2, позволяет сделать следующие выводы.

Из конструктивных параметров гидроциклонов определяющим классификацию является величина разгрузочного отношения  $d_c/d_n$ . Размеры питающей насадки слабо влияют на крупность продуктов разделения.

При увеличении содержания твердого в питании гидроциклонов при условии  $q_{-74}^c = 95\%$  уменьшается эффективность классификации, соответственно увеличивается циркуляция нагрузки замкнутого цикла измельчения. Чтобы избежать этого, необходимо увеличивать давление пульпы на входе в гидроциклоны, что не всегда возможно. Этот фактор сдерживает производительность технической секции по руде. В связи с этим рекомендуется уменьшить ширину питающей насадки с 60 мм, используемых в ГЦ-50, до 40 мм, что приведет к увеличению давления на входе. Тогда получение слива крупностью  $q_{-74}^c = 95\%$  возможно при увеличении содержания твердого в питании гидроциклонов до 43 %.

Применяя указанную методику, можно изменять значения  $Q_p^m$ , получив таким образом для каждого значения  $Q_p^m$  свое значение  $d_c/d_n$  при условии выполнения ограничения (32) на крупность сливного продукта для каждого фиксированного значения  $d_s$ . По полученным значениям  $d_c/d_n$  легко построить графическую зависимость  $d_c/d_n$  от  $Q_p^m$ , по которой необходимо выбрать конструктивные параметры гидроциклонов при изменении величины  $Q_p^m$ , обеспечивающие выполнение ограничения (32) на крупность сливного продукта.

В результате получен единый комплекс уравнений, описывающих процесс измельчения в мельнице и классификации в гидроциклонах в условиях замкнутого цикла. Предложенная методика расчета крупности продуктов классификации дает возможность определения конструктивных параметров гидроциклонов по заданной крупности сливного продукта при изменении нагрузки по исходной руде при заданных параметрах классификации.

Предложенная модель замкнутого цикла мокрого измельчения может быть широко использована при проектировании обогатительных фабрик, прогнозировании технологических параметров классификации при замене оборудования и для решения задач управления замкнутым циклом мокрого измельчения.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Линч А. Дж. Циклы дробления и измельчения. М.: Недра, 1981. С. 31–89.
2. Поваров А. И. Гидроциклоны на обогатительных фабриках. М.: Недра, 1978. 231 с.
3. Поваров А. И., Перов В. А. Выбор гидроциклонов для операций классификации и для работы в замкнутом цикле с мельницей // Цветные металлы. 1981. № 7. С. 97–101.
4. Пилов П. И. О повышении эффективности классификации в гидроциклонах // Металлургия и горная промышленность. 1976. № 5. С. 51–52.
5. Мюллер В., Нейсе Т., Шуберт Х. Расчет гидроциклонов на основе турбулентной модели // Экспресс-информация. Обогащение полезных ископаемых. 1976. № 6. Реф. 21. С. 27–28.
6. Пилов П. И. Турбулентная модель гидроциклона // Обогащение полезных ископаемых. 1980. № 2. С. 9–15.
7. Рундквист В. А. К расчету процесса классификации в гидроциклоне // Обогащение руд. 1966. № 1. С. 28–32.
8. Фальстром П. Изучение гидроциклона как классифицирующего аппарата // Экспресс-информация. Горнорудная промышленность. 1963. № 42. Реф. 231. С. 32–33.
9. Фан Ван Тхуан. Уравнения кривых для расчета извлечения узких по крупности классов в сливе гидроциклона // Обогащение руд. 1973. № 4. С. 14–17.
10. Фан Ван Тхуан. Определение крупности граничного зерна при классификации в гидроциклоне // Изв. вузов. Горный журнал. 1975. № 10. С. 155–158.
11. Антонычев М. Я., Начирняк Ф. И. Аналитические и экспериментальные исследования поведения минеральных зерен в процессе классификации в водной среде // Труды института Уралмеханобр. 1969. Вып. 15. С. 27–31.
12. Горюн А. Е., Сухомлинов Д. Н. Влияние конструкции, геометрических размеров и режима работы гидроциклона на его механические показатели // Машиностроение для пищевой промышленности. 1978. № 8. С. 91–96.
13. Кутепов А. М., Прусак А. И., Терновский И. Г. Определение конструктивных размеров гидроциклонов по заданным технологическим параметрам // Проблемы тонкого измельчения, классификации и дозирования: тезисы докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. Иваново, 1982. 78 с.
14. Попов В. М. Рудничные водоотливные установки. М.: Недра, 1983. 69 с.

15. Брагин В. Г. Уравнения кривой для расчета извлечения узких по крупности классов в пески гидроциклонов // Изв. вузов. Горный журнал. 1981. № 10. С. 126–130.

16. Брагин В. Г., Серeda К. В. Математическая модель процесса дробления руды // Изв. вузов. Горный журнал. 2010. № 1. С. 97–103.

Поступила в редакцию 22 марта 2017 года

## SIMULATION MODEL AND THE CALCULATION OF MAGNETITE ORE WET GRINDING CLOSED CYCLE TECHNOLOGICAL PARAMETERS

**Bragin V. G., Volkov E. B.** – The Ural State Mining University, Ekaterinburg, the Russian Federation.  
E-mail: evgeniy.volkov.ursmu@yandex.ru

Nowadays hydrocyclones are the main classifying equipment at the grinding departments of the processing factories. One of the urgent tasks of the raising the efficiency of the wet grinding closed cycles is to select the design of hydrocyclone devices and to define their operating parameters, which could eventually provide drain product of the specified size under minimum circulation. The paper suggests the methods of selecting the structural parameters of hydrocyclones and the original ore load on the mill for the given size of drain product. The result is a single set of equations describing the process of grinding in the mill and classification in hydrocyclones in conditions of a closed cycle. The proposed methods of calculating the size of the classification products allow to define the structural parameters of hydrocyclones for a given size of drain product when the original ore load changes at the defined classification parameters. The proposed model of the closed cycle of wet grinding can be widely used to design processing plants, predict technological parameters of classification under equipment replacement, and solve the problems of wet grinding closed cycle management.

**Key words:** classifying equipment; magnetite ore; hydrocyclones; closed cycle; grinding; mill; structural parameters of hydrocyclones; operating parameters of hydrocyclones.

### REFERENCES

1. Linch A. Dzh. *Tsikly drobleniia i izmel'cheniia* [Crushing and grinding cycles]. Moscow, Nedra Publ., 1981, pp. 31–89.
2. Povarov A. I. *Gidrotsiklony na obogatitel'nykh fabrikakh* [Hydrocyclones at processing plants]. Moscow, Nedra Publ., 1978. 231 p.
3. Povarov A. I., Perov V. A. [Hydrocyclones selection for the operations of classification and for the operation in a closed cycle with a mill]. *Tsvetnye metally – Non-ferrous Metals*, 1981, no. 7, pp. 97–101. (In Russ.)
4. Pilov P. I. [Regarding the classification efficiency improvement in hydrocyclones]. *Metallurgicheskaiia i gornorudnaia promyshlennost' – Metallurgical and Mining Industry*, 1976, no. 5, pp. 51–52. (In Russ.)
5. Müller V., Neise T., Shubert Kh. [Hydrocyclones calculation on the basis of the turbulent model]. *Ekspres-informatsiia. Obogashchenie poleznykh iskopaemykh – Express-Information. Mineral Processing*, 1976, no. 6, paper 21, pp. 27–28.
6. Pilov P. I. [Turbulence model of a hydrocyclone]. *Obogashchenie poleznykh iskopaemykh – Mineral Processing*, 1980, no. 2, pp. 9–15. (In Russ.)
7. Rundkvist V. A. [Regarding the calculation of the process of classification in hydrocyclone]. *Obogashchenie Rud – Mineral Processing*, 1966, no. 1, pp. 28–32. (In Russ.)
8. Fal'strom P. [The study of a hydrocyclone as a classification instrument]. *Ekspres-informatsiia. Gornorudnaia promyshlennost' – Express-Information. Ore Mining Industry*, 1963, no. 42, paper. 231, pp. 32–33.
9. Fan Van Tkhuuan. [Equations of curves to calculate the extraction of narrow-sized classes in a drain of a hydrocyclone]. *Obogashchenie Rud – Mineral Processing*, 1973, no. 4, pp. 14–17. (In Russ.)
10. Fan Van Tkhuuan. [Determination of the size of near-mesh grain under the classification in hydrocyclone]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal – News of the Higher Institutions. Mining Journal*, 1975, no. 10, pp. 155–158. (In Russ.)
11. Antonychev M. Ia., Nachirniak F. I. [Analytical and experimental investigations of mineral grains behavior in the process of classification in water medium]. *Trudy instituta Uralmekhanobr – Proceeding of Uralmechanobr Institute*, 1969, issue 15, pp. 27–31. (In Russ.)
12. Gorion A. E., Sukhomlinov D. N. [The influence of structure, geometrical dimension, and operation mode of hydrocyclone on its mechanical indices]. *Mashinostroenie dlia pishchevoi promyshlennosti – Mechanical Engineering for Food Industry*, 1978, no. 8, pp. 91–96. (In Russ.)
13. Kutepov A. M., Prusak A. I., Ternovskii I. G. [Determination of structural size of hydrocyclones for the given parameters]. *Problemy tonkogo izmel'cheniia, klassifikatsii i dozirovaniia: tezisy dokl. Vsesoiuzn. nauch.-tekhn. konf.* [Proc. All-Union Sci.-Tech. Conf. "The problems of fine grinding, classification, and dosing]. Ivanovo, 1982. 78 p. (In Russ.)
14. Popov V. M. *Rudnichnye vodootivnye ustanovki* [Mining drainage facilities]. Moscow, Nedra Publ., 1983. 69 p.
15. Bragin V. G. [The equations of a curve to calculate the extraction of narrow-sized classes into the sands of hydrocyclones]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal – News of the Higher Institutions. Mining Journal*, 1981, no. 10, pp. 126–130. (In Russ.)
16. Bragin V. G., Sereda K. V. [Mathematical model of ore grinding process]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal – News of the Higher Institutions. Mining Journal*, 2010, no. 1, pp. 97–103. (In Russ.)