

ДК 622.75/.76

РАСЧЕТ ОЖИДАЕМЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КЛАССИФИКАЦИИ В ГИДРОЦИКЛОНЕ

Ю. Э. Аккерман

В настоящей статье предлагается метод расчета ожидаемых результатов классификации на примере классификации суспензии кварца в гидроциклоне. Результаты классификации оцениваются по извлечению узких фракций крупности в продукты классификации. Для этого питание, слив и пески подвергают анализу по крупности, на основании которых подсчитывают извлечения узких фракций [Авершин, 1958]:

$$\varepsilon_{x_i} = \gamma \frac{\Delta\beta_{x_i}}{\Delta\alpha_{x_i}}, \quad (1)$$

где ε_{x_i} — извлечение узкой фракции средней крупностью x_i в соответствующий продукт классификации, доли единицы;

γ — весовой выход твердой фазы соответствующего продукта классификации, доли единицы;

$\Delta\beta_{x_i}$ — содержание узкой фракции средней крупностью x_i в продукте классификации, доли единицы;

$\Delta\alpha_{x_i}$ — содержание узкой фракции средней крупностью x_i в питании классификатора, доли единицы.

На рис. 1, а приведены зависимости $\varepsilon_{x_i} = f(x_i)$. Для удобства сравнения кривых извлечения и исключения зависимости их от распределения воды по продуктам классификации извлечение узких фракций крупности в слив и пески определяют не на все исходное питание $Q_{исх}$, а лишь ту его часть $Q'_{исх}$, которая действительно подвергалась разделению по крупности. Такое извлечение назовем относительным (рис. 1, б).

$$Q'_{исх} = (1 - \varepsilon_{\Pi}^w) Q_{исх}; \quad (2)$$

$$\varepsilon'_{сл} = \frac{\varepsilon_{сл}}{1 - \varepsilon_{\Pi}^w}; \quad (3)$$

$$\varepsilon'_{\Pi} = \frac{\varepsilon_{\Pi} - \varepsilon_{\Pi}^w}{1 - \varepsilon_{\Pi}^w}, \quad (3')$$

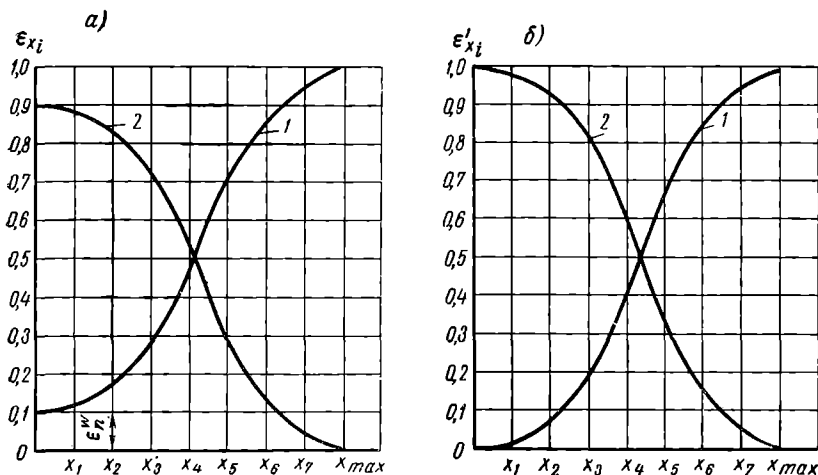
где ε_{Π}^w — извлечение воды в пески, доли единицы; $\varepsilon'_{сл}$, ε'_{Π} — относительные извлечения узких классов в слив и пески, доли единицы; $\varepsilon_{сл}$, ε_{Π} — извлечения узких классов крупности в продукты классификации относительно всего исходного материала, доли единицы.

Расчет ожидаемых результатов классификации включает определение выходов и характеристик крупности продуктов классификации, а также объемного содержания в них твердого.

Определение гранулометрического состава слива. Предположим, что зависимость относительных извлечений узких классов крупности в слив от их крупности известна и задана в виде функции

$$\varepsilon'_{\text{сл}} = F(x), \quad (4)$$

где x — крупность бесконечно узкого класса.



Кривые извлечений *а* и относительных извлечений *б* узких фракций крупности в продукты классификации

1 — пески; 2 — слив.

Относительный выход слива $\gamma'_{\text{сл}}$ представится в виде суммы:

$$\gamma'_{\text{сл}} = \sum_{i=1}^n F(x_i) \Delta \alpha_{x_i} = \int_0^{x_{\text{max}}} F(x) d\alpha, \quad (5)$$

где x_{max} — максимальная крупность слива; $\alpha = f(x)$ — уравнение кумулятивной по минусу характеристики крупности исходного питания.

Относительное количество материала в сливе мельче любой заданной крупности x_i выразится отношением

$$\frac{Q_{\text{сл}} \beta_{x_i}}{Q_{\text{исх}}} = \gamma'_{\text{сл}} \beta_{x_i} = \int_0^{x_i} F(x) f'(x) dx. \quad (6)$$

Суммарное же содержание класса мельче x_i в сливе

$$\beta_{x_i} = \frac{\gamma'_{\text{сл}} \beta_{x_i}}{\gamma'_{\text{сл}}} = \frac{\int_0^{x_i} F(x) f'(x) dx}{\int_0^{x_{\text{max}}} F(x) f'(x) dx} \quad (7)$$

По этой формуле можно рассчитать полную гранулометрическую характеристику крупности слива.

Выход продуктов классификации и объемное содержание твердого в них определим из

$$Q_{\text{сл}} = \gamma'_{\text{сл}} Q'_{\text{исх}} = \gamma'_{\text{сл}} (1 - \epsilon_{\text{п}}^w) Q_{\text{исх}}, \quad (8)$$

где $Q_{\text{сл}}$ — вес твердой фазы в сливе.

Разделив правую и левую части этого выражения на $Q_{\text{исх}}$, получим

$$\gamma_{\text{сл}} = \gamma'_{\text{сл}} (1 - \epsilon_{\text{п}}^w). \quad (9)$$

Величину $(1 - \epsilon_{\text{п}}^w)$ выразим через объемный выход слива $B_{\text{сл}}$ на примере мономинеральной суспензии с удельным весом твердого $\delta_{\text{т}}$:

$$1 - \epsilon_{\text{п}}^w = B_{\text{сл}} \frac{1 + R}{1 + R\gamma'_{\text{сл}}}, \quad (10)$$

где R — объемное отношение твердого к жидкому в исходном питании.

Объемные содержания твердой фазы в сливе и песках

$$\lambda_{\text{сл}} = \frac{R\gamma'_{\text{сл}}}{R\gamma'_{\text{сл}} + 1}; \quad (11)$$

$$\lambda_{\text{п}} = \frac{R[(1 - \gamma'_{\text{сл}}) + \epsilon_{\text{п}}^w]}{R(1 - \gamma'_{\text{сл}}) + \epsilon_{\text{п}}^w(1 + R)}. \quad (12)$$

Таким образом, располагая конкретными уравнениями функций $\alpha = f(x)$ и $\epsilon_{\text{сл}} = F(x)$ и значениями величин R , x_{max} и $B_{\text{сл}}$, обусловленными свойствами исходного питания и режимом классификации, можно наметить следующий порядок расчета ожидаемых результатов классификации: 1) определение относительного выхода $\gamma'_{\text{сл}}$ по формуле (5); 2) расчет кумулятивной по минусу характеристики крупности слива по формуле (7); 3) определение извлечения воды в слив $(1 - \epsilon_{\text{п}}^w)$ по формуле (10); 4) определение выходов твердой фазы в слив по формуле (9) и в пески по формуле

$$\gamma_{\text{п}} = 1 - \gamma_{\text{сл}}; \quad (13)$$

5) расчет кумулятивной по минусу характеристики крупности песков по балансовой формуле

$$v_{x_i} = \frac{\alpha_{x_i} - \gamma_{\text{сл}}\beta_{x_i}}{\gamma_{\text{п}}}, \quad (14)$$

где v_{x_i} — суммарное содержание класса мельче x_i в песках, доли единицы; 6) определение объемных концентраций твердого в сливе и песках по формулам (11) и (12).

Для практического пользования методикой расчета ожидаемых результатов классификации необходимо установить физический смысл и математическое выражение функции $\epsilon_{\text{сл}} = F(x)$.

Физический смысл и математическое выражение функции $\epsilon'_{\text{сл}} = F(x)$. С учетом явлений, происходящих в процессе классификации, при массовом падении частиц широкого диапазона крупности, когда возникает встречное течение среды, препятствующее осаждению частиц и обусловленное тем, что частицы, достигая границы раздела слива и песков, вытес-

няют равные им объемы среды, выражение извлечения отдельных узких классов крупности запишется в виде

$$\varepsilon_{\text{сл}x_i} = \frac{h_{\text{сл}} + h_0 - (h_{x_i} + h_0)}{H}, \quad (15)$$

где $h_{\text{сл}}$ — высота слоя пульпы, удаляемого в слив; h_0 и h_{x_i} — путь, пройденный соответственно потоком среды и частицами крупностью x_i относительно среды; H — общая высота пульпы в отстойнике.

Окончательно получим

$$\varepsilon_{\text{сл}x_i} = (1 - \varepsilon_{\text{п}}^w) \left(1 - \frac{v'_{x_i}}{v'_{x_{\text{max}}}} \right), \quad (16)$$

где v'_{x_i} — среднестатистическая скорость движения фракции средней крупности x_i относительно среды

$$1 - \varepsilon_{\text{п}}^w = \frac{h_{\text{сл}} + h_0}{H}. \quad (17)$$

На основании равенства (3)

$$\varepsilon'_{\text{сл}x_i} = 1 - \frac{v'_{x_i}}{v'_{x_{\text{max}}}}. \quad (18)$$

Таким образом,

$$F(x) = 1 - \frac{v'_{x_i}}{v'_{x_{\text{max}}}}. \quad (19)$$

Остается найти обобщенную зависимость скорости падения частиц от крупности, справедливую для любого режима их движения.

При равномерном движении тела сферической формы в среде

$$Q_{\text{ш}} = S, \quad (20)$$

где $Q_{\text{ш}}$ — вес шара в среде,

$$Q_{\text{ш}} = \frac{\pi}{6} x_{\text{ш}}^3 (\delta - \Delta) g; \quad (21)$$

S — сила сопротивления среды,

$$S = \psi v^2 x_{\text{ш}}^2 \Delta; \quad (22)$$

где $x_{\text{ш}}$ — диаметр шара, см; δ — плотность вещества, г/см³; Δ — плотность среды, г/см³; g — ускорение силы тяжести, см/сек²; v — скорость падения тела в среде, см/сек; ψ — коэффициент сопротивления.

По П. В. Лященко [1940] и Р. Б. Розенбаум [1955], при свободном падении шара коэффициент сопротивления тела шарообразной формы

$$\psi_{\text{ш}} = \frac{(3\pi)^2}{\text{Re}^2 \psi_{\text{ш}}} + \sqrt{2} \frac{3\pi}{\sqrt{\text{Re}^2 \psi_{\text{ш}}}} + 0,157, \quad (23)$$

где Re — число Рейнольдса, $\text{Re} \leq 10\,000$,

$$\text{Re}^2 \psi_{\text{ш}} = \frac{\pi}{6} x_{\text{ш}}^3 (\delta - \Delta) g \frac{\Delta}{\mu^2}, \quad (24)$$

где μ — коэффициент вязкости среды, пз.

После подстановки величин (22), (23), (24), (21) в уравнение (20) получим скорость шара

$$v_{\text{ш}} = \frac{\sqrt{\frac{\pi}{6 \cdot 0,157} \cdot \frac{\delta - \Delta}{\Delta} g x_{\text{ш}}^2}}{\sqrt{\frac{\frac{\pi}{6} \cdot 0,157 (\delta - \Delta) g \Delta}{(3\pi)^2 \mu^2} + \sqrt{2} \frac{3\pi\mu}{0,157 \sqrt{\frac{\pi}{6} (\delta - \Delta) g \Delta}} \sqrt{x_{\text{ш}}^3 + x_{\text{ш}}^3}}} \quad (25)$$

Для упрощения записи уравнения (25) примем обозначения:

$$\begin{aligned} A_{\text{ш}} &= \sqrt{\frac{\pi}{6 \cdot 0,157} \cdot \frac{\delta - \Delta}{\Delta} g} \\ B_{\text{ш}} &= \frac{(3\pi)^2 \mu^2}{\frac{\pi \cdot 0,157}{6} (\delta - \Delta) g \Delta}; \\ C_{\text{ш}} &= \sqrt{2} \frac{3\pi\mu}{0,157 \sqrt{\frac{\pi}{6} (\delta - \Delta) g \Delta}}. \end{aligned} \quad (26)$$

Тогда обобщенное уравнение скорости шара

$$v_{\text{ш}} = \frac{A_{\text{ш}} x_{\text{ш}}^2}{\sqrt{B_{\text{ш}} + C_{\text{ш}} \sqrt{x_{\text{ш}}^3 + x_{\text{ш}}^3}}}. \quad (27)$$

При падении минеральных зерен, у которых форма отлична от шарообразной,

$$\begin{aligned} A_z &= A_{\text{ш}} \vartheta_A, \\ B_z &= B_{\text{ш}} \vartheta_B, \\ C_z &= C_{\text{ш}} \vartheta_C, \end{aligned} \quad (28)$$

где A_z, B_z, C_z — коэффициенты в формуле скорости падения минерального зерна неправильной формы; $\vartheta_A, \vartheta_B, \vartheta_C$ — поправочные коэффициенты, учитывающие влияние формы зерна и специфику оценки его крупности.

Крупность минеральных зерен оценивается размером квадратной ячейки сита, через которое они проходят. Тонкие зерна (мельче 40 мк) характеризуются по крупности размером поперечника, определяемого под микроскопом. Скорость падения минерального зерна неправильной формы

$$v = \frac{A_z x^2}{\sqrt{B_z + C_z \sqrt{x^3 + x^3}}}. \quad (29)$$

При совместном падении массы зерен различной крупности (что имеет место в процессе классификации) на скорость падения минеральных частиц, как показали наши опыты, оказывает влияние и вязкость суспензии. Она учитывается выражением

$$v = \frac{A_z x^2}{\sqrt{B_z \left(1 + k\lambda \frac{\lambda_{\text{max}}}{\lambda_{\text{max}} - \lambda}\right)^2 + C_z \left(1 + k\lambda \frac{\lambda_{\text{max}}}{\lambda_{\text{max}} - \lambda}\right) \sqrt{x^3 + x^3}}}, \quad (30)$$

где

$$1 + k\lambda \frac{\lambda_{\max}}{\lambda_{\max} - \lambda} = \frac{\mu_c}{\mu_0}, \quad (31)$$

μ_c — вязкость суспензии, пз ; μ_0 — вязкость жидкой фазы, пз ; λ — объемная концентрация твердой фазы, доли единицы; $\lambda_{\max}$ — максимальное объемное содержание твердой фазы в суспензии, при котором она становится нетекучей, доли единицы; k — коэффициент пропорциональности.

Нашими экспериментами установлено, что k и $\lambda_{\max}$ являются функциями гранулометрического состава исходного питания, характеризуемого величиной

$$z = \frac{X_{\max}^3}{X_{\text{ср}}^3}, \quad (32)$$

где $X_{\max}$ — максимальная крупность исходного питания, см ; $X_{\text{ср}}$ — средняя крупность смеси зерен, см ,

$$X_{\text{ср}}^3 = \sum_{i=1}^n \Delta \alpha_{x_i} x_i^3. \quad (33)$$

Опытным путем для кварца максимальной крупностью $X_{\max} = 0,3 \text{ мм}$ нами получены выражения для

$$k = 2,835 \sqrt[3]{z-1} \quad (34)$$

и

$$\lambda_{\max} = -1,52 \sqrt[3]{z} + 4,38 \sqrt[6]{z} - 2,514. \quad (35)$$

Рассмотренные зависимости сохраняются и при классификации материала под действием центробежной силы, но в формуле (30) числовые значения коэффициентов A , B и C соответственно изменяются в зависимости от величины фактора разделения. Окончательно

$$F(x) = 1 - \frac{x^2 \sqrt{\frac{B_3}{F} \left(\frac{\mu_c}{\mu_0} \right)^2 + \frac{C_3}{\sqrt{F}} \frac{\mu_c}{\mu_0} \sqrt{x_{\max}^3}}}{x_{\max}^2 \sqrt{\frac{B_3}{F} \left(\frac{\mu_c}{\mu_0} \right)^2 + \frac{C_3}{\sqrt{F}} \frac{\mu_c}{\mu_0} \sqrt{x^3 + x_{\max}^3}}}, \quad (36)$$

где F — фактор разделения,

$$F = \frac{a_{\text{ц}}}{g}, \quad (37)$$

$a_{\text{ц}}$ — центробежное ускорение, см/сек^2 .

Определение показателей работы гидроциклона, необходимых для расчета ожидаемых результатов классификации. Для определения статистической величины центробежного ускорения, развиваемого в гидроциклоне, объемного выхода слива и максимальной крупности зерен в сливе использован гидроциклон диаметром 75 мм с углом конусности 20° . Гидроциклон работал с постоянным диаметром входного отверстия $d_{\text{вх}}$, равным $0,1$ диаметра гидроциклона $D_{\text{гц}}$ круглого сечения. Этот размер определен экспериментально. Он обеспечивал минимальные потери напора на входе в цилиндрическую часть гидроциклона. В ходе эксперимента также установлено, что при изменении диаметра сливной насадки в пре-

* По И. Майяваки [1960].

делах $d_{\text{сл}} = (0,25-0,8) D_{\text{гц}}$ объемная производительность гидроциклона не зависит от размера песковой насадки и выражается формулой

$$Q = \frac{10 F_{\text{вх}} \sqrt{2gH}}{\sqrt{1 - \left(\frac{F_{\text{вх}}}{F_{\text{м}}}\right)^2 + \epsilon_{\text{кон}} + \epsilon_{\text{вх}} + \left(\sqrt{\frac{D_{\text{гц}}}{d_{\text{сл}}}} - 1\right)^2}}, \quad (38)$$

где Q — общая объемная производительность гидроциклона, $\text{см}^3/\text{сек}$; $F_{\text{вх}}$ — площадь входного отверстия гидроциклона, см^2 ; $F_{\text{м}}$ — площадь сечения магистрального трубопровода, на котором установлен манометр, см^2 ; H — давление на входе в гидроциклон (показания манометра), м вод. ст. ; $\epsilon_{\text{кон}}$ — коэффициент сопротивления в коническом переходе от магистрального трубопровода к питающему патрубку гидроциклона; $\epsilon_{\text{вх}}$ — коэффициент сопротивления на входе в гидроциклон, при $D_{\text{гц}} = 75 \text{ мм}$ $\epsilon_{\text{вх}} = 0,1125$; $d_{\text{сл}}$ — диаметр сливного отверстия, см .

Формула (38) справедлива для работы гидроциклона на воде и пульпе.

Объемный выход слива гидроциклона в зависимости от его геометрических размеров

$$B_{\text{сл}} = M \sqrt{1 - \frac{H_0}{H}}, \quad (39)$$

где M — функция размеров $d_{\text{сл}}$ и $d_{\text{песк}}$ и относительной вязкости истечения пульпы,

$$M = \frac{D_{\text{песк}} - d_{\text{песк}}}{D_{\text{песк}} - 0,65 d_{\text{сл}}} \cdot \frac{1}{\eta_{\text{ц}}} \leq 1; \quad (40)$$

$D_{\text{песк}}$ — максимальный размер пескового отверстия, при котором независимо от величин давления на входе в гидроциклон (при данном $d_{\text{сл}}$) $B_{\text{сл}} = 0$, см ,

$$D_{\text{песк}} = 0,94 d_{\text{сл}} \left(\frac{D_{\text{гц}}}{d_{\text{сл}}} \right)^{0,25} \quad (41)$$

$\eta_{\text{ц}}$ — относительная вязкость пульпы,

$$\eta_{\text{ц}} = \frac{\mu_{\text{ц}}}{\mu_0} = 1 + \left(\frac{\rho_{\text{ц}}}{\Delta} \right)^2 \lambda \frac{\lambda_{\text{max}}}{\lambda_{\text{max}} - \lambda}, \quad (42)$$

$\rho_{\text{ц}}$ — плотность пульпы, $\text{г}/\text{см}^3$; H_0 — минимальная величина давления на входе в гидроциклон, начиная с которой при данных значениях $d_{\text{сл}}$ и $d_{\text{песк}}$ появляется слив, м вод. ст. ,

$$H_0 = 0,3 d_{\text{песк}} \frac{D_{\text{песк}}}{D_{\text{песк}} - d_{\text{песк}}}. \quad (43)$$

Экспериментом также установлено, что величина среднестатистического центробежного ускорения, развиваемого в гидроциклоне,

$$a_{\text{ц}} = \frac{v_{\text{вх}}^2}{R_{\text{гц}}}, \quad (44)$$

где $v_{\text{вх}}$ — скорость пульпы на входе в гидроциклон, $\text{см}/\text{сек}$; $R_{\text{гц}}$ — радиус цилиндрической части гидроциклона, см .

Такое значение среднестатистического центробежного ускорения свидетельствует о том, что зона разделения в гидроциклоне находится во

внешнем потоке его цилиндрической части. Следовательно, скорость движения максимального зерна, уносимого в слив,

$$v_{x_{\max}} = \frac{s}{t}, \quad (45)$$

где t — время классификации или пребывания потока пульпы в классифицирующем аппарате, *сек*,

$$t = \frac{V}{Q}; \quad (46)$$

V — полезная часть объема классифицирующего аппарата, через которую проходит поток пульпы, см^3 ; s — путь, пройденный максимальным зерном в потоке, до границы разделения объемов, см , $s = f(B_{\text{сл}})$.

Для цилиндрического кольца

$$s = 0,5 [V(D_{\text{гц}} - 2d)^2(1 - B_{\text{сл}}) + B_{\text{сл}}D_{\text{гц}}^2 - (D_{\text{гц}} - 2d)]. \quad (47)$$

Исходя из сплошности потока, движущегося по спирали вдоль цилиндрической поверхности, круглое входное отверстие заменено квадратным, равновеликим ему по площади. Поэтому

$$d = 0,885 d_{\text{вх}}. \quad (48)$$

Для гидроциклона полезным объемом является объем цилиндра с толщиной стенок d и высотой $h_{\text{цил}}$:

$$V = \frac{\pi}{4} [D_{\text{гц}}^2 - (D_{\text{гц}} - 2d)^2] h. \quad (49)$$

Экспериментом установлено, что

$$h = 0,25 h_{\text{цил}} \frac{0,8 D_{\text{гц}}}{d_{\text{сл}}}. \quad (50)$$

В нашем случае $h_{\text{цил}} = 0,5 D_{\text{гц}}$.

Рассмотрим численный пример для следующих условий: диаметр гидроциклона 7,5 *см*; высота цилиндрической части $h_{\text{цил}} = 3,75$ *см*; угол конусности $\alpha = 20^\circ$; диаметр магистрального трубопровода $d_{\text{м}} = 1,5$ *см*; угол конусности в коническом переходе $\theta = 40^\circ$.

Условия работы гидроциклона: $d_{\text{вх}} = 0,75$ *см*; $d_{\text{сл}} = 3$ *см*; $d_{\text{неск}} = 2$ *см*; давление на входе $H = 10$ *м вод. ст.*; объемная концентрация твердого в пульпе $\lambda = 0,101$; плотность твердого $\delta = 2,65$ *г/см³*; вязкость воды $\mu_0 = 0,01$ *пз*.

Коэффициенты в обобщенном уравнении скорости свободного падения зерен кварца:

$$A_3 = 35,64 \text{ см}^{0,5}/\text{сек}; \quad B_3 = 21 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3; \quad C_3 = 11,8 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{1,5}.$$

Гранулометрический состав исходного питания гидроциклона следующий:

Крупность $x \cdot 10^{-4}$, <i>см</i>	Содержание класса Δa_{x_i} , %	Суммарное содержание по минусу $\sum \Delta a_{x_i}$, %
—300+250	5,00	95,00
—250+200	7,50	87,50
—200+140	9,30	78,20
—140+100	17,80	60,40
—100+75	14,10	46,30
—75+60	5,30	41,00
—60+50	8,00	33,00
—50+40	4,50	28,50

Крупность $x \cdot 10^{-4}, \text{ см}$	Содержание класса $\Delta a_{x_i}, \%$	Суммарное содержание по минусу $\sum \Delta a_{x_i}, \%$
—40+35	2,50	26,00
—35+30	4,50	21,50
—30+25	4,50	17,00
—25+20	1,80	15,20
—20+15	5,20	10,00
—15+10	5,80	4,20
—10	4,20	—

Для изложенных условий приводим значения показателей классификации:

	$x_{\text{таж}}, \text{ см}$	$\gamma_{\text{сл}}, \%$	$B_{\text{сл}}, \%$	$\epsilon_{\text{сл}}^w, \%$	$\lambda_{\text{сл}}, \%$	$\lambda_{\text{песк}}, \%$	$Q, \text{ см}^3/\text{сек}$	F
Опытные	$30 \cdot 10^{-4}$	9,80	78,80	86,50	1,285	43,00	477	320
Расчетные	$30,7 \cdot 10^{-4}$	9,94	77,20	85,00	1,310	43,60	495	344

Как видно, при одних и тех же исходных данных ожидаемые значения показателей классификации материала в гидроциклоне, полученные по предлагаемой методике, близки к опытным. Можно предполагать, что зависимости, установленные для гидроциклона диаметром 75 мм, останутся справедливыми для гидроциклонов других размеров.

ЛИТЕРАТУРА

- А в е р ш и н И. Н. Вопросы процесса разделения в механических классификаторах. Обогащение руд, № 2, 1958.
 Л я щ е н к о П. В. Гравитационные методы обогащения. Гостоптехиздат, 1940.
 М а й я в а к и И. О формуле для расчета вязкости тяжелых суспензий. Реф. ж. Горное дело, № 6, 1960.
 Р о з е н б а у м Р. Б. Стесненное падение шара в вязкой жидкости. Автореф. дисс., ЛГИ, 1955.