

УДК 622.7

**В.И. КРИВОЩЕКОВ**, канд. техн. наук  
(Украина, Днепропетровск, Государственное ВУЗ "Национальный горный университет")

## **МЕХАНИЗМ ГИДРОЦИКЛОНИРОВАНИЯ С ПРИСТЕННОЙ ПЕРЕЧИСТКОЙ СУСПЕНЗИИ**

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Процессы разделения зернистых материалов по крупности и плотности нашли широкое применение в горнорудной, угольной, металлургической и других отраслях промышленности. При этом требования к продуктам разделения материалов по крупности постоянно возрастают, что заставляет обращать внимание многих исследователей к схемам классификации с использованием гидроциклонов и совершенствованию процесса гидроциклонирования.

Наряду с работами по конструированию гидроциклонов, оптимизации их параметров, улучшению рабочих поверхностей за счет применения новых износостойких материалов перспективным направлением совершенствования процесса гидроциклонирования является новое формирование структуры течения водоминеральных суспензий. Поскольку такое формирование связано с изменением концентрации твердых частиц в жидкой среде, характеризующейся плотностью и динамической вязкостью, то оно зависит от абсолютного давления в потоке вязкой среды, ее турбулентности, коэффициентов диффузии жидкой и твердой фаз водоминеральной суспензии. При этом уменьшение массовой доли твердых частиц, по сравнению с их содержанием в зоне ввода в гидроциклон, наблюдается только в направлении снижения давления двухфазной среды, а скорость ее изменения определяется гидродинамическими процессами в гидроциклоне.

Таким образом, в основе механизма гидроциклонирования водоминеральных суспензий следует рассматривать величину концентрации твердых частиц в локальных зонах, которая изменяется при протекании гидродинамических процессов по направлению движения потока и степени его турбулентности, что непосредственно связано со структурой течения суспензии.

Анализ исследований и публикаций. Одной из задач при расчете гидродинамических параметров турбулентного потока суспензии в гидроциклоне является установление связи между коэффициентами турбулентной диффузии твердых частиц и их концентрацией. При этом следует учитывать сложный характер (межфазный и внутрифазный) взаимодействия [1-3], который ограничивает область применения известных полуэмпирических и эмпирических зависимостей [1, 4].

Ламинарное и турбулентное течение суспензии в каналах с параллельными и суживающимися стенками рассмотрено в работах [5, 6]. Одним из недостатков этих работ является отсутствие однозначной связи между коэффициентами турбулентной диффузии твердых частиц и их концентрацией в вихревом потоке суспензии и в осадочном слое. Так в работе [5] рассмотрена двухслойная схема ламинарного течения суспензии по наклонной поверхности. При турбулентном

## Гравітаційна сепарація

движении двухфазной среды эта схема дает заметные погрешности при вычислениях [4], что связано с увеличением интенсивности межфазных взаимодействий [1] и турбулентности жидкой фазы.

Согласно работам [7, 8] структуру турбулентного потока суспензии в гидроциклоне можно представить в виде локальных зон течения с индивидуальной для каждой из них величиной массопереноса твердой фазы [8].

Теоретические и экспериментальные исследования [9] показали, что характерной особенностью динамики жидкой среды в гидроциклоне является образование нисходящего пристенного и восходящего приосевого потоков, а также поверхности нулевых осевых скоростей (рис. 1).

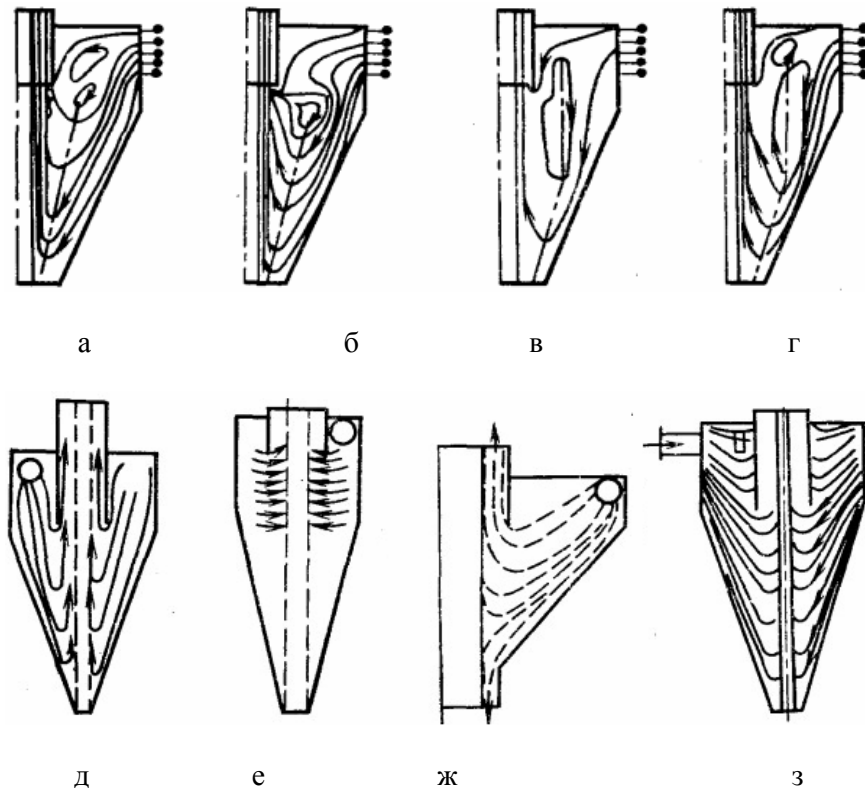


Рис. 1. Картины динамики жидкости в гидроциклоне согласно представлений некоторых авторов [9]:  
а – Г. Тарьяна (1961); б – С. Беднарского (1964); в – Д. Бредли (1965);  
г – А.И. Поварова (1971); д – К. Ритема (1961); е – Е.А. Непомнящего (1977);  
ж – Г.Г. Никольского (1981); з – А.В. Кравцова (1984)

При определении граничной крупности твердых частиц рассматривают их равновесное состояние под действием результирующей массовых и поверхностных сил на некотором радиальном расстоянии от оси гидроциклона [10]. Уменьшение крупности твердых частиц приводит к тому, что они начинают повторять перемещение мелких турбулентных вихрей и двигаться вдоль линий тока жидкой фазы (рис. 2).

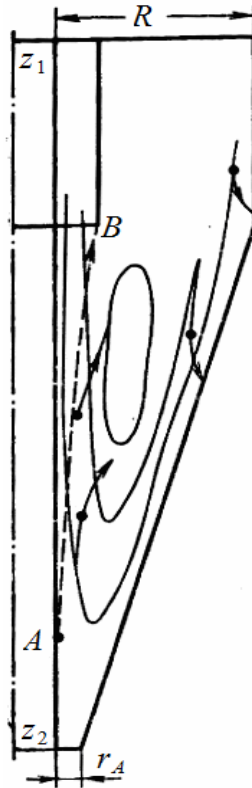


Рис. 2. Траектории движения твердых частиц [10]

Постановка задачи. Цель данной работы – анализ особенностей локальных течений водоминеральной среды в гидроциклоне.

Изложение материала и результаты. Рассмотрим схему локальных течений водоминеральной среды в гидроциклоне (рис. 3).

Из рис. 3 следует, что взаимодействие зоны ввода исходной суспензии 1 со стенками сливного патрубка и крышкой цилиндрической части корпуса, а также с восходящим приосевым потоком 6 приводит к формированию подкрышечного потока с замкнутым вихрем 2 и восходящего центрального потока 3 соответственно. Между пристенным нисходящим 5 и восходящим центральным 3 потоками образуется замкнутый двойной кольцевой вихрь 4. Наличие в нем двух смежных вихревых областей течения связано с неравномерным распределением осевых скоростей суспензии по обеим сторонам от поверхности их нулевых значений 7. Замедленное течение суспензии по мере приближения к поверхности нулевых осевых скоростей в нисходящем приосевом потоке 8, а также взаимодействие последнего с пристенным нисходящим потоком 5 приводит к возникновению надпескового буферного потока 10.

Влияние центробежной силы на поток суспензии вблизи оси гидроциклона вызывает разрыв сплошности жидкой фазы суспензии и приводит к образованию воздушного столба 9.

Сравнительный анализ схем течения (рис. 3) показывает, что при использовании устройства перечистки 12 (рис. 3,б) наблюдается увеличение размеров

## Гравітаційна сепарація

надпескового буферного потока 10, и соответственно средней толщины пристенного 5 и нисходящего приосевого 8 потоков и уменьшение продольные размеров замкнутого двойного кольцевого вихря 4. Увеличение размеров надпескового буферного потока 10 связано с оттеснением поверхности нулевых осевых скоростей 7 потоком концентрированной суспензии в межпластинчатом (межцилиндрическом) пространстве 12. Это снижает засорение песковой фракцией восходящего приосевого 6 и центрального 3 потоков.

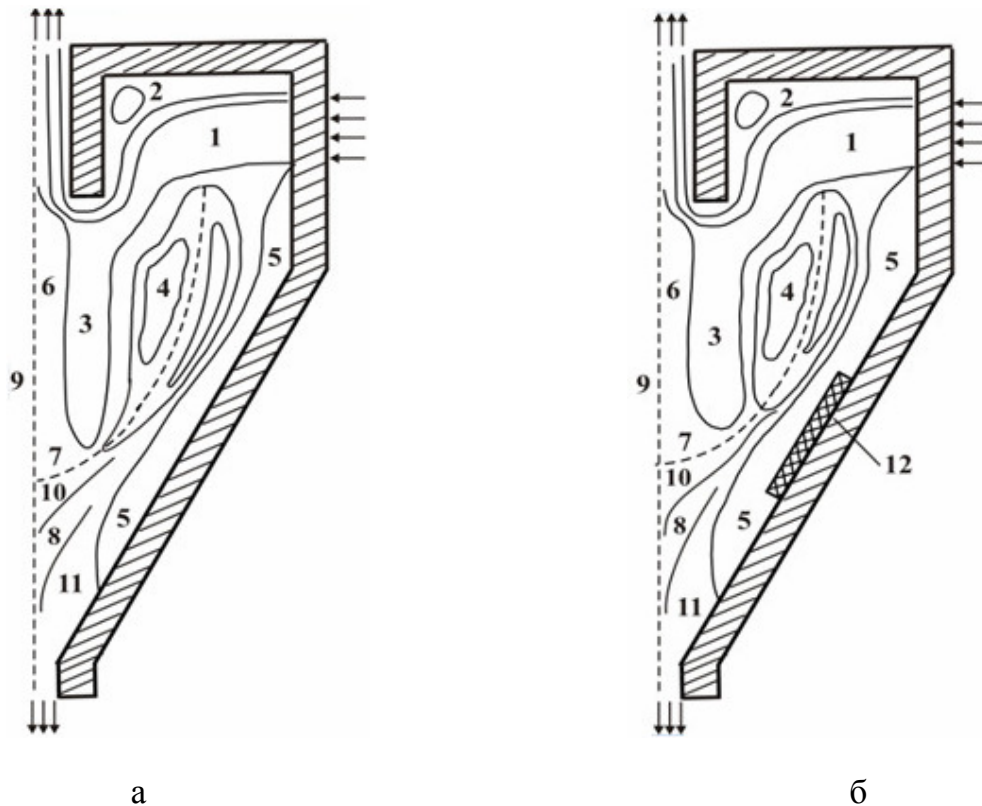


Рис. 3. Схема локальных зон течения в гидроциклоне без перечистки (а) и с пристенной перечисткой (б)

Уменьшение размеров замкнутого двойного кольцевого вихря 4 (рис. 3) влечет за собой снижение в нем кинетической энергии жидкой фазы. В результате некоторые из твердых частиц выходят за пределы указанной локальной зоны и попадают в нисходящий приосевой 8, а также в надпесковый буферный 10 потоки и далее в песковый поток 11.

Для определения гидродинамических параметров суспензии в гидроциклоне (рис. 3) можно использовать уравнения осредненного турбулентного движения двухфазной среды для случая локально однородной и изотропной турбулентности [11]. Течение суспензии в межпластинчатых каналах (рис. 3,б), а также в локальных зонах 1, 5, 6, 8, 11 будем считать двухмерным без циркуляции.

Запишем соотношения для дифференциальных операторов в декартовой системе координат  $(x, y)$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \equiv grad \equiv \frac{\partial}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial}{\partial y} \mathbf{j}; \\ div = \frac{\partial}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y}; \\ \Delta = \frac{\partial^2}{\partial x_i^2} = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}, \end{array} \right. \quad (1)$$

где  $\mathbf{i}, \mathbf{j}$  – единичные векторы осей координат  $OX$  и  $OY$ ;  $x_i, x_j$  – декартовые координаты [12];  $i, j = 1, 2$  ( $x, y$ ) и  $i \neq j$ .

Согласно работе [2] и с учетом выражений (1) уравнения осредненного турбулентного движения двухфазной среды в проекциях на оси декартовой системы координат представим в виде

$$\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial x_j} + \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial x_i} + \mathbf{M} = 0, \quad (2)$$

где  $t$  – время, с;  $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{E}, \mathbf{M}$  – матрицы столбцы.

Рассматривая движение тонких, мелких и крупных твердых частиц в турбулентном потоке суспензии [11, 13], построим соответствующие матрицы столбцы.

Для тонких частиц:

$$\mathbf{A}_t = \begin{bmatrix} 0 \\ u_i \\ u_{t,i} \\ C_t \end{bmatrix}; \quad \mathbf{B}_t = \begin{bmatrix} u_j \\ u_i u_j + p \rho^{-1} - \nu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \\ u_{t,i} u_{t,j} + p_t \rho_z^{-1} - \\ - \nu_t \left( \frac{\partial u_{t,i}}{\partial x_j} + \frac{1}{3} \frac{\partial \nu_t}{\partial x_i} \right) \\ 0 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{E}_t = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -D_t \frac{\partial C_t}{\partial x_j} + C_t u_{t,i} + \\ + B_t C_t F_{t,i} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{M}_t = \begin{bmatrix} 0 \\ -F_i \\ -F_{t,i} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где  $u_{t,i}, u_{t,j}$  и  $u_i, u_j$  – результирующие скорости тонких частиц и турбулентных вихрей жидкой фазы в данной точке потока двухфазной среды в проекциях на оси декартовой системы координат, м/с;  $\rho_z, \rho$  – плотности твердой и жидкой фазы, кг/м<sup>3</sup>;  $F_{t,i}, F_i$  – результирующие массовых сил, действующих на тонкие частицы и турбулентные вихри жидкой фазы в проекциях на оси декартовой системы координат, Н/кг;  $p, p_t$  – давления жидкой фазы в данной точке потока суспензии и на поверхностях тонких частиц, Па;  $\nu, \nu_t$  – коэффициенты турбулентной вязкости жидкой фазы и макровязкости тонких частиц, м<sup>2</sup>/с;  $C_t$  – объемная

## Гравітаційна сепарація

концентрація тонких частиц, д.е.;  $D_t$  – коефіцієнт турбулентної дифузії тонких частиц,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $B_t$  – коефіцієнт подвижності тонких частиц,  $\text{с}/\text{кг}$ ;  $t$  – текущее время,  $\text{с}$ .

Аналогічним образом строятся матрицы столбцы для мелких ( $\mathbf{A}_m, \mathbf{B}_m, \mathbf{E}_m, \mathbf{M}_m$ ) и крупных ( $\mathbf{A}_k, \mathbf{B}_k, \mathbf{E}_k, \mathbf{M}_k$ ) частиц. В частности, значения элементов матриц для мелких частиц  $(\mathbf{B}_m)_{3,1}$ ,  $(\mathbf{B}_k)_{3,1}$ ,  $(\mathbf{E}_k)_{4,1}$  и  $(\mathbf{M}_k)_{4,1}$  будут определяться как:

$$(\mathbf{B}_m)_{3,1} = u_{m,i} u_{m,j};$$

$$(\mathbf{B}_k)_{3,1} = u_{k,i} u_{k,j}; (\mathbf{E}_k)_{4,1} = 0;$$

$$(\mathbf{M}_k)_{4,1} = u_{k,i} (\partial C_k / \partial x_i),$$

где  $u_{m,i}$ ,  $u_{m,j}$  и  $u_{k,i}$ ,  $u_{k,j}$  – результирующие скорости мелких и крупных частиц в данной точке потока двухфазной среды в проекциях на оси декартовой системы координат,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $C_k$  – объемная концентрация крупных частиц, д.е.

Течение суспензии в локальных зонах 2 – 4, 10 (рис. 3) носит вихревой характер. Вводя цилиндрическую систему координат  $(r, \varphi, z)$ , запишем следующие соотношения для дифференциальных операторов:

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \equiv \text{grad} \equiv \frac{\partial}{\partial q_i} = \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \varphi} + \frac{\partial}{\partial z}; \\ \text{div} = \frac{\partial}{\partial q_k} (r) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \varphi} + \frac{\partial}{\partial z}; \\ \Delta = \frac{\partial}{\partial q_k} \left( r \frac{\partial}{\partial q_j} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}, \end{array} \right. \quad (4)$$

где  $q_i, q_j, q_k$  – криволинейные координаты (общий вид);  $i, j, k = 1, 2, 3$  ( $r, \varphi, z$ );  $r, \varphi, z$  – радиальная, угловая и осевая цилиндрические координаты.

По аналогии с уравнением (2) получим

$$\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial q_j} + \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial q_k} + \mathbf{M} = 0. \quad (5)$$

Матрицы столбцы в уравнении (5) строятся аналогично, только с учетом выражений (4).

Коефициенты турбулентной диффузии тонких  $D_t$ , мелких  $D_m$  и крупных  $D_k$  частиц согласно работам [4, 11] определяются по формулам:

$$\begin{cases} D_t = 3^{-1} \lambda u; \\ D_m = 3^{-1} \lambda u \left( 1 + \frac{d_m^2 \rho_z IU}{18 \lambda \mu_c} \right)^{-1}; \\ D_k = -\lambda^3 \rho_c (54 d_k \mu_c)^{-1} I^2 U^2, \end{cases} \quad (6)$$

где  $u$ ,  $U$  – результирующие скорости жидкой фазы и суспензии в данной точке потока, м/с;  $\mu_c$  – средняя динамическая вязкости суспензии, Па·с;  $d_m$ ,  $d_k$  – эквивалентные диаметры мелких и крупных частиц, м;  $\rho_c$  – средняя плотность суспензии, кг/м<sup>3</sup>;  $\lambda$  – микромасштаб турбулентности, м;  $I = (\lambda L^{-1})^{1/3}$  – интенсивность турбулентности, д.е.,  $L$  – макромасштаб турбулентности.

В соответствии с работами [3, 4]:

$$\begin{cases} U = \frac{1}{\rho_c} [\rho_i C_i u + \rho(1 - C_i) u]; \\ \rho_c = C_i \rho_i + \rho(1 - C_i); \\ \mu_c = \mu \left[ 1 + \frac{2C_i}{(1 + 1,2C_i^{2/3})^2} \right], \end{cases} \quad (7)$$

где  $C_i$  – средневзвешенная объемная концентрация частиц  $i$ -й компоненты твердой фазы, д.е.;  $\rho_i$  – средневзвешенная плотность частиц  $i$ -й компоненты твердой фазы, кг/м<sup>3</sup>.

При течении суспензии в межпластинчатых каналах в качестве макромасштаба турбулентности  $L$  (характерного размера) принимают среднюю ширину локальной зоны  $H$ , а в локальных зонах течений 1, 5, 6, 8, 11 – их средний диаметр  $d_v$  (рис. 3,а).

Величину изменения полного давления и интенсивности турбулентности в межпластинчатых каналах и в локальных зонах течений 1, 5, 6, 8, 11 определяют так:

$$\begin{cases} p_o(\chi, \xi) = A_0(\chi, \xi) \{ p_h(\xi) + 0,5 \rho_c(\chi, \xi) (U(\chi, \xi))^2 - \sum \Delta p_m(\chi, \xi) \}; \\ I = (\lambda H^{-1})^{1/3}, \end{cases} \quad (8)$$

где  $\Delta p_m$  – местные потери давления, Па;  $p_h$  – статическое давление суспензии в данной точке потока, расположенной на расстоянии  $y$  от крышки цилиндрической части корпуса (рис. 3), Па;  $\chi = x \cos(\alpha) + y \sin(\alpha)$  – текущая координата, отсчитываемая от начала локальной зоны в направлении течения суспензии, м;  $\xi = y \cos(\alpha) - x \sin(\alpha)$  – текущая координата, отсчитываемая от внешней границы локальной зоны перпендикулярно течению суспензии, м;  $\alpha$  – угол поворота де-

## Гравітаційна сепарація

картовой системы координат в данной точке потока, град;  $A_0(\chi, \xi)$  – поправочный коэффициент, учитывающий положение данной точки в локальной зоне течения.

Поскольку основными потерями давления в гидроциклоне являются местные, то потери на трение в первом выражении системы (8) не учитываются.

По аналогии с выражениями (8) для локальных зон течений 2 – 4, 10 получим:

$$\begin{cases} p_o(r, z) = A_0(r, z) \{ p_h(z) + 0,5 \rho_c(r, z) (U_\tau^2 + U_z^2) - \sum \Delta p_m(r, z) \}; \\ I = (\lambda d_v^{-1})^{1/3}, \end{cases}$$

где  $U_\tau$ ,  $U_z$  – тангенциальная и осевая составляющие скорости суспензии в данной точке потока, м/с.

Для определения величины изменения средневзвешенной массовой концентрации частиц  $i$ -й компоненты твердой фазы [6, 14] в поперечном сечении межпластинчатых каналов и в локальных зонах течений 1, 5, 6, 8, 11 воспользуемся уравнением

$$c_i(\chi, \xi) = c_{0i} \left( e^{-\int_0^H \frac{A_i v_{i,\chi}(\xi)}{D_{i,\chi}(\xi)} d\xi} + e^{-\int_0^l \frac{A_i v_{i,\xi}(\chi)}{D_{i,\xi}(\chi)} d\chi} \right), \quad (9)$$

где  $c_{0i}$  – средневзвешенная массовая концентрация частиц  $i$  – й компоненты твердой фазы в начале зоны ввода исходной суспензии, кг/м<sup>3</sup>;  $v_{i,\chi}$ ,  $v_{i,\xi}$  – продольная и поперечная составляющие скорости частиц  $i$  – й компоненты твердой фазы, м/с;  $D_{i,\chi}$ ,  $D_{i,\xi}$  – коэффициенты турбулентной диффузии частицы  $i$  – й компоненты твердой фазы, соответствующие скоростям  $v_{i,\chi}$  и  $v_{i,\xi}$ , м<sup>2</sup>/с;  $l$  – протяженность локальной зоны течения в направлении движения суспензии, м;  $A_i = f(I, N_i, B_i)$  – поправочный коэффициент, учитывающий интенсивность турбулентности  $I$ , число столкновений  $N_i$  и коэффициент подвижности  $B_i$  частиц  $i$ -й компоненты твердой фазы ( $-1 < A_i < 1$ ).

Ниже поверхности нулевых осевых скоростей (рис. 3) происходит увеличение массовой концентрации твердых частиц, а выше этой поверхности, наоборот, ее снижение. При этом для величины коэффициентов турбулентной диффузии наблюдается обратная картина.

Результаты оценочного расчета средневзвешенной массовой концентрации твердых частиц в локальных зонах течений (рис. 3), полученные с помощью уравнения (9) приведены в табл. 1 и 2.



Таблиця 1

Результаты оценочного расчета средневзвешенной массовой концентрации твердых частиц в восходящем приосевом и пристенном нисходящем потоках с учетом скорости суспензии  $U_c = 8$  м/с на входе в гидроциклон без перечистки

Восходящий приосевой поток						
$c_{0i}$ , кг/м <sup>3</sup>	$v_{i,\chi}$ , м/с	$v_{i,\xi}$ , м/с	$D_i(\chi)$ , м <sup>2</sup> /с	$D_i(\xi)$ , м <sup>2</sup> /с	$A_i$	$c_i(\chi, \xi)$ , кг/м <sup>3</sup>
150	0,9	0,4	$4 \cdot 10^{-7}$	$1,8 \cdot 10^{-7}$	$6,2 \cdot 10^{-7}$	75,31
Пристенный нисходящий поток						
$c_{0i}$ , кг/м <sup>3</sup>	$v_{i,\chi}$ , м/с	$v_{i,\xi}$ , м/с	$D_i(\chi)$ , м <sup>2</sup> /с	$D_i(\xi)$ , м <sup>2</sup> /с	$A_i$	$c_i(\chi, \xi)$ , кг/м <sup>3</sup>
150	0,5	0,2	$5 \cdot 10^{-8}$	$2,25 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-8}$	273,05

Таблиця 2

Результаты оценочного расчета средневзвешенной массовой концентрации твердых частиц в восходящем приосевом и пристенном нисходящем потоках с учетом скорости суспензии  $U_c = 8$  м/с на входе в гидроциклон с перечисткой

Восходящий приосевой поток						
$c_{0i}$ , кг/м <sup>3</sup>	$v_{i,\chi}$ , м/с	$v_{i,\xi}$ , м/с	$D_i(\chi)$ , м <sup>2</sup> /с	$D_i(\xi)$ , м <sup>2</sup> /с	$A_i$	$c_i(\chi, \xi)$ , кг/м <sup>3</sup>
150	0,85	0,37	$3,8 \cdot 10^{-7}$	$1,71 \cdot 10^{-7}$	$6,8 \cdot 10^{-7}$	67,52
Пристенный нисходящий поток						
$c_{0i}$ , кг/м <sup>3</sup>	$v_{i,\chi}$ , м/с	$v_{i,\xi}$ , м/с	$D_i(\chi)$ , м <sup>2</sup> /с	$D_i(\xi)$ , м <sup>2</sup> /с	$A_i$	$c_i(\chi, \xi)$ , кг/м <sup>3</sup>
150	0,4	0,15	$4 \cdot 10^{-8}$	$1,8 \cdot 10^{-8}$	$-2 \cdot 10^{-8}$	360,21

Распределение средневзвешенной массовой концентрации частиц  $i$ -й компоненты твердой фазы по среднему радиусу  $r_v$  локальных зон течений 2 – 4, 10 можно представить уравнением вида

$$c_i(r) = c_{0i} e^{-\int_0^{r_v} \frac{A_i v_{i,r}}{D_i(r)} dr}, \quad (10)$$

где  $v_{i,r}$  – радиальная составляющая скорости частиц  $i$ -й компоненты твердой фазы, м/с.

### *Выводы и направления дальнейших исследований:*

- сформулированы принципы технологической оптимизации процесса гидроциклонирования, заключающихся в обосновании гидродинамических параметров и структуры потока для обеспечения максимального перехода заданных компонентов зернистого материала в продукты разделения, наиболее эффективно подготовленные к дальнейшей переработке по существующей технологии;

## **Гравітаційна сепарація**

---

- механізм гідроциклонирования оснований на изменении давления водоминеральной суспензии и концентрации ее твердой фазы в локальных зонах гидроциклона вследствие изменения гидродинамических условий протекания процесса и кривизны поверхности реверсирования потока, на которой осевая составляющая скорости равна нулю;

- в гидроциклоне с пристенной перечисткой происходит увеличение размеров надпескового буферного потока, что приводит к снижению засорения песковой фракцией восходящего приосевого и центрального потоков суспензии, в которых концентрация твердых частиц уменьшается, а величина коэффициента их турбулентной диффузии увеличивается.

Дальнейшие исследования автора будут направлены на анализ особенностей распределения крупности твердой фазы в локальных зонах течений гидроциклона без перечистки и с пристенной перечисткой.

### **Список литературы**

1. Нигматулин Р.И. Основы механики гетерогенных сред [Текст] / Р.И. Нигматулин. – М.: Наука, 1978. – 336 с.
2. Приходько А.А. Компьютерные технологии в аэрогидродинамике и тепломассообмене [Текст] / А.А. Приходько. – К.: Наук. думка, 2003. – 379 с.
3. Фортъе А. Механика суспензий [Текст] / А. Фортъе. – М.: Мир, 1971. – 264 с.
4. Кривошеков В.И. Турбулентно-диффузионная модель гидроциклона с перечисткой в его конической части [Текст] / В.И. Кривошеков // Збагачення корисних копалин: наук.-техн. зб. – 2009. – Вип. 36(77) – 37(78). – С. 90-103.
5. Проблемы гравитационного обогащения титано-цирконовых песков [Текст] / Б.А. Блюсс, А.М. Сокил, О.Г. Гоман. – Д.: Полиграфист, 1999. – 190 с.
6. Пилов П.И. Распределение частиц твердой фазы в турбулентном потоке жидкости при выделении осадка [Текст] / П.И. Пилов // Наук. вісн. НГА України. – 1998. – №1. – С. 74-77.
7. Кривошеков, В.И. К разработке пневмосепаратора с осевым вводом исходного продукта [Текст] / В.И. Кривошеков, Л.А. Новиков // Збагачення корисних копалин: наук.-техн. зб. – 2011. – Вип. 44(85). – С. 86-96.
8. Щукин В.К. Теплообмен, массоперенос и гидродинамика закрученных потоков в осесимметричных каналах [Текст] / В.К. Щукин, А.А. Халатов. – М.: Машиностроение, 1982. – 200 с.
9. Лопатин А.Г. Центробежное обогащение руд и песков [Текст] / А.Г. Лопатин. – М.: Недра, 1987. – 224 с.
10. Поваров А.И. Гидроциклоны на обогатительных фабриках [Текст] / А.И. Поваров. – М.: Недра, 1978. – 232 с.
11. Кривошеков В.И. Кинетический подход к выводу уравнений движения двухфазной среды в сепарационных аппаратах [Текст] / В.И. Кривошеков // Обогащение руд. – 2001. – №6. – С. 23 – 26.
12. Иевлев В.М. Численное моделирование турбулентных течений [Текст] / В.М. Иевлев. – М.: Наука, 1990. – 216 с.
13. Кривошеков В.И. Определение коэффициента диффузии твердых частиц в турбулентном потоке суспензии [Текст] / В.И. Кривошеков // Збагачення корисних копалин: наук.-техн. зб. – 1999. – Вип. 4(45). – С. 77-78.
14. Кривошеков В.И. Распределение концентрации твердых частиц суспензии в канале

## **Гравітаційна сепарація**

---

с параллельными и суживающимися стенками [Текст] / В.И. Кривошеков, Л.А. Новиков // Збагачення корисних копалин: наук.-техн. зб. – 2008. – Вип. 34(75). – С. 86-96.

© Кривошеков В.И., 2017

*Надійшла до редколегії 08.09.2017 р.  
Рекомендовано до публікації д.т.н. Б.О. Блюсом*