

2. Проведення та експлуатація горизонтальних гірничих виробок на шахтах з крутим та похилим заляганням вугільних пластів: Навчальний посібник для вузів / Під редакцією С.С.Гребьонкіна: Донецьк, КП "Region", 2001 – 410 с.

УДК 622.7.002.2:622.34

Е.В. Семененко, В.Б. Бобров

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМА РАБОТЫ ГИДРОТРАНСПОРТНОЙ УСТАНОВКИ С УЧЕТОМ ПРОЦЕССОВ СГУЩЕНИЯ ГИДРОСМЕСИ В ЗУМПФАХ**

Розглянуті математичні моделі фізичних процесів, які відбуваються в трубопроводі та накопичувальних апаратах гідротранспортної установки для технології гравітаційного збагачення розсипів рідкоземельних та поліметалевих руд. На основі запропонованих моделей гідротранспортна установка розглядається як єдина гідравлічна мережа, що складається з двох накопичувальних апаратів, з'єднаних напірним трубопроводом.

### **THE HYDROTRANSPORT PLANT WORKING CONDITIONS' SIMULATION TAKING INTO ACCOUNT THE HYDRAULIC LIQUID CONCENTRATION PROCESSES IN SUMPS**

The mathematical models of physical processes which take place in the pipelines and accumulating apparatuses of hydrotransport plants that are used in the gravity separation technologies of rare-earth and complex ores alluvial deposits are considered. According to offered models the hydrotransport plant is considered as integrated hydraulic system which consists of two accumulating apparatuses that are connected with the pressure pipe.

Существование на территории Украины россыпных месторождений редкоземельных и полиметаллических руд, месторождений черных металлов и каменного угля, а также высокий потребительский спрос на металлопрокат и концентраты этого минерального сырья на мировых рынках определяют актуальность модернизации и совершенствования технологий их добычи и переработки в направлении повышения производительности. При этом успешная конкуренция с зарубежными горнодобывающими и металлургическими компаниями возможна только при условии внедрения ресурсо- и энергосберегающих, экологически безопасных технологий, обеспечивающих повышение надежности и эффективности процесса переработки без увеличения капитальных и эксплуатационных затрат [1 - 5].

Анализ физических процессов и технологических решений, а также их экспериментальная проверка в условиях рудных и угольных обогатительных фабрик Украины показывают, что модернизация технологий обогащения минерального сырья наиболее перспективна на базе гравитационных методов обогащения, которые обеспечивают экологическую безопасность и необходимую степень извлечения ценного компонента при низком уровне энерго- и ресурсоемкости [3 - 7].

Основными технологическими звеньями, обладающими потенциалом для модернизации, являются транспортные системы, обеспечивающие пульпообразование и доставку россыпей к месту переработки. Режимы и параметры каж-

дого из этих аппаратов исследовались различными авторами, и для некоторых из них существует большое количество методик и рекомендаций по расчетам параметров и характеристик в зависимости от свойств перерабатываемого сырья [1 – 3, 7].

Известны исследования режимов работы напорных гидротранспортных систем для открытых горных разработок и технологий обогащения, результаты которых позволяют производить оценку гидравлических уклонов и критических скоростей, выбирать диаметр трубопровода и тип центробежного насоса, рассчитывать производительность установки [3 - 6]. Однако эти методики не учитывают влияние на параметры и режимы работы гидротранспортных комплексов процессов пульпообразования и сгущения.

Кроме того, как показывает опыт модернизации рудных и угольных обогатительных фабриках, в гравитационных технологиях обогащения недопустимо рассматривать режим работы отдельно взятого аппарата. В этих технологиях все элементы, начиная от гидротранспортного комплекса, обеспечивающего пульпообразование в забое карьеров, и заканчивая сгустительной воронкой, обеспечивающей сгущение гидросмеси, должны рассматриваться как единое целое, поскольку связаны между собой объемами и параметрами гидросмеси.

Такой подход к анализу и расчету напорных гидротранспортных комплексов является новым и для своего развития требует разработки научно обоснованных моделей физических процессов, протекающих в элементах гидротранспортной установки.

Задачей статьи является обоснование гидродинамических моделей физических процессов в накопительных аппаратах и построение на их основе модели напорной гидротранспортной установки, учитывающей влияние процесса пульпообразования до попадания гидросмеси в трубопровод и ее сгущения после выхода из магистрали.

Необходимыми элементами гидротранспортной установки, используемой в технологиях обогащения, являются зумпф, насосный агрегат, трубопровод и емкость для приема гидросмеси (обычно это сгустительная воронка), (рис. 1) [1, 5, 6]. Гидротранспортная установка как элемент технологии переработки минерального сырья характеризуется подачей и концентрацией гидросмеси. Концентрация гидросмеси определяется режимом пульпообразования, величиной критической скорости гидротранспортирования и суммарной мощностью электродвигателей установленных насосов. Очевидно, что эта величина во многом определяется параметрами и режимом работы зумпфа. Подача гидротранспортной установки существенно зависит от концентрации гидросмеси, а также от свойств транспортируемого материала и определяется из решения уравнения [3, 4, 6]

$$Q^3 + \frac{\beta}{a(Q) + \alpha} Q^2 - (\gamma - c)Q + b = 0; \quad (1)$$

$$\begin{aligned}
a &= \frac{8(1 + 2Ar_1S_1 - Ar_1S_1^2)}{\pi^2 g(1 + Ar_1S_1)} \sum_n \left( \frac{\lambda_n L_n}{D_n^5} + \frac{\xi_n^o + \text{int}\left(\frac{L_n}{L_n^D}\right) \xi_n^*}{D_n^4} \right); & Ar_i &= \frac{\rho_i - \rho_o}{\rho_o}; \\
b &= \frac{\pi Ar_2 (Ar_2 - Ar_1 S_1) S_2 (1 - S_2)^x \left( \frac{17.68d_2 + 0.005(t - 26)}{26\sqrt{d_2}} \right)}{12.5(1 + Ar_1 S_1)} \sum_n D_n^{2.5} L_n \cos \theta_n; \\
\lambda_n &= \frac{0.309}{\lg^2 \left( \frac{0.187}{1 + 0.0033t + 0.00022t^2} \frac{Q}{D_n} \right)}; & w &= \frac{17.68d_2 + 0.005(t - 26)}{26\sqrt{d_2}}; \\
x &= 5 \left[ 1.28 - 0.2 \lg(d_2 (0.68d_2 + 0.005t - 0.13)(1 + 0.0033t + 0.00022t^2)) \right]; \\
\gamma &= \sum_i \chi_i \gamma_i \left( \frac{n_i}{n'_i} \right)^2 \left( \frac{D_i}{D'_i} \right)^{2,46}; & \beta &= \sum_i \chi_i \beta_i \left( \frac{n_i}{n'_i} \right)^2 \left( \frac{D_i}{D'_i} \right)^{2,46}; & \alpha &= \sum_i \chi_i \alpha_i \left( \frac{n_i}{n'_i} \right)^2 \left( \frac{D_i}{D'_i} \right)^{2,46}; \\
c &= \frac{0.3(Ar_3 - Ar_1 S_1) S_3}{(1 + Ar_1 S_1)} f \sum_n L_n \cos \theta_n \pm Z(1 + Ar_1 S_1); & S_i &= R_i \varphi_*; \\
\chi_i &= 1 - \frac{0.56S}{1 + \sum_l Ar_l S_l} \left( \sum_{k=1}^m (Ar_k - Ar_1 S_1) \sum_{j=1}^n \sigma_k q_j \left[ Ar_{jk} + 3.73 \lg \left( 1737 \frac{d_{ikck}}{D_a^{(i)}} \right) \right] \right),
\end{aligned}$$

где  $Q$  - подача насоса;  $\chi$  - коэффициент, учитывающий влияние концентрации гидросмеси и свойств транспортируемого материала;  $d_{icp}$  - диаметр частиц с плотностью  $\rho_{sk}$ ;  $\sigma_k$  - объемная доля в россыпях материала плотностью  $\rho_{sk}$ ;  $\rho$  - плотность гидросмеси;  $\rho_o$  - плотность несущей жидкости;  $\varphi_n$  - объемная доля твердого в гидросмеси;  $S_i$  - объемная доля в гидросмеси частиц  $i$ -го типа (1 - тонкие, 2 - мелкие, 3 - кусковые);  $R_i$  - объемная доля частиц  $i$ -го типа в транспортируемом материале (1 - тонкие, 2 - мелкие, 3 - кусковые);  $q_j$  - объемная доля  $j$ -го класса крупности во фракции с плотностью  $\rho_k$  в %;  $D_a^{(i)}$  - диаметр рабочего колеса  $i$ -го насоса;  $Ar_i$  - параметр Архимеда материала  $i$ -й фракции;  $g$  - ускорение свободного падения;  $\lambda_n$  - коэффициент гидравлического сопротивления трения на  $n$ -ом участке трубопровода;  $L_n$  - длина  $n$ -го участка магистрали;  $D_n$  - диаметр трубопровода  $n$ -го участка магистрали;  $\xi_n^o$  - коэффициент местных гидравлических сопротивлений на  $n$ -ом участке;  $\xi_n^*$  - коэффициент местных гидравлических сопротивлений, обусловленных сварными швами трубопровода на  $n$ -ом участке;  $L_n^D$  - длина секций труб, из которых смонтирован трубопровод на  $n$ -м участке магистрали;  $d_2$  - средневзвешенный диаметр мелких частиц;  $\theta_n$  - угол наклона  $n$ -го участка магистрали к горизонту;  $t$  - темпе-

ратура гидросмеси;  $x$  - коэффициент, учитывающий влияние температуры гидросмеси на скорость стесненного падения мелких частиц;  $w$  - коэффициент, учитывающий влияние температуры гидросмеси на скорость свободного падения мелких частиц;  $f$  - обобщенный коэффициент трения частиц кусковой фракции о стенку трубопровода;  $Z$  - разница геодезических отметок конца и начала магистрали;  $D_i$  - диаметр рабочего колеса, установленного на  $i$ -м насосе;  $D'_i$  - паспортное значение диаметра рабочего колеса  $i$ -го насоса;  $n_i$  - частота вращения рабочего колеса  $i$ -го насоса;  $n'_i$  - паспортное значение частоты вращения рабочего колеса, для которого приведена расходно-напорная характеристика  $i$ -го насоса;  $\gamma_i, \beta_i, \alpha_i$  - коэффициенты аппроксимации расходно-напорной характеристики  $i$ -го насоса.

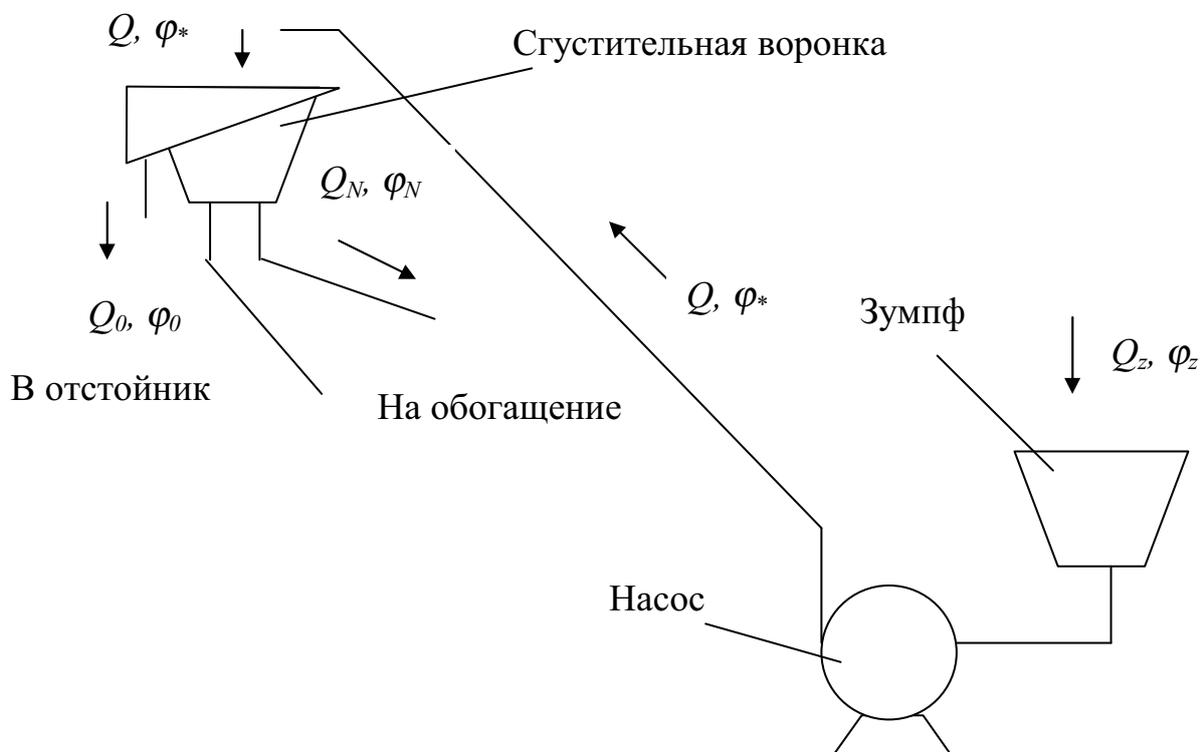


Рис. 1 – Схема типичной гидротранспортной установки

Уравнение (1) является нелинейным относительно  $Q$  и может быть решено только численными методами, например, методом половинного деления. Для реализации метода половинного деления необходимо задать интервал изменения подачи, на котором будет осуществляться поиск решения. Параметры этого интервала определяются границами рабочих областей установленных насосов и критической скоростью гидротранспортирования [6]

$$Q_{kp} = \frac{\pi \Omega}{4} \sqrt{g D_*^{2.5} \cos \alpha_*}. \quad (2)$$

$$\Omega = c_2 \sqrt[3]{\frac{Ar_2 (Ar_2 - Ar_1 S_1) S_2 (1 - S_2)^x \left( \frac{17.68 d_2 + 0.005(t - 26)}{26 \sqrt{g d_2}} \right)}{(1 + Ar_1 S_1)}} +$$

$$+ 0.24 c_1 \sqrt[4]{\frac{Ar_1^3 (1 - S_1) S_1 g d_1}{(1 + Ar_1 S_1)}} \sqrt{1 + 0.0033t + 0.00022t^2} +$$

$$+ c_3 \sqrt{\frac{(Ar_3 - Ar_1 S_1) S_3}{(1 + Ar_1 S_1)}} f,$$

где  $\Omega$  - коэффициент, учитывающий влияние свойств и концентрации транспортируемого материала;  $D_*$ ,  $\cos \alpha_*$  - диаметр и угол наклона участка магистрали, для которого выполняется условие  $\max\{\sqrt{D_n} \cos \alpha_n\}$ .

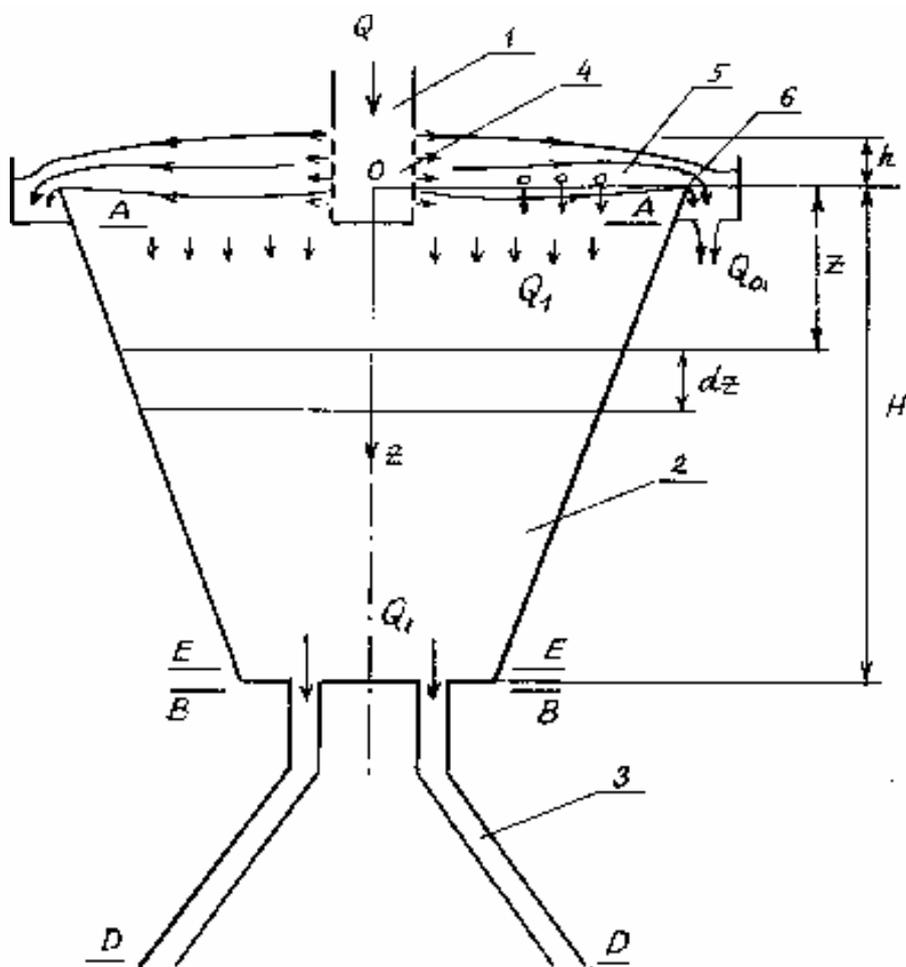
Из (1) и (2) видно, что величины, входящие в эти формулы, существенно зависят от концентрации гидросмеси, значение которой определяется характером процесса движения гидросмеси в зумпфе. Зумпф и сгустительная воронка похожи между собой по форме и характеру протекающих процессов – в обоих случаях течение гидросмеси происходит в сужающемся канале под действием силы тяжести (рис. 2). Эти два накопительных аппарата отличаются геометрическими размерами (зумпф, как правило, значительно больше сгустительной воронки), а также расходами гидросмеси в выводящих патрубках.

При анализе гидродинамических явлений в зумпфах и сгустительных воронках все поле течения можно условно разбить на две зоны: зона приповерхностного слоя толщиной  $h$ , в которой осуществляется течение от подающего устройства на водослив через борт воронки, и зона основного течения вниз, которое реализуется ниже сечения А-А, лежащего примерно на уровне нижнего основания подающего устройства (см. рис. 2). Течение в приповерхностном слое осуществляется в основном радиально по направлению от подающего устройства к сливному борту воронки. Во время этого течения происходит осветление текущего слоя за счет его разгрузки в основной поток. Основной поток ниже сечения А-А можно считать одномерным, направленным вертикально вниз [1, 2].

Таким образом, в основную зону течения накопительного аппарата поступает секундный расход  $Q_1 = Q - \Delta Q$ , а общий секундный объем, уходящий в слив через борт воронки, составляет  $\Delta Q$ . За счет перелива происходит первоначальное сгущение потока с расходом  $Q$  и концентраций  $\varphi_n$  до потока с расходом  $Q_1$  и концентрацией  $\varphi_n - \varphi_{осв}$ , поступающего в зону основного течения. Степень этого сгущения зависит от величины расхода слива  $\Delta Q$ , диаметра верхнего края воронки  $D_1$  и начальной концентрации гидросмеси. Объемная доля твердого в сливе [1, 2]

$$\varphi_{осв} = \left( 1 - 0.252 \frac{\pi D_1^2}{\Delta Q} w \right) \varphi_n. \quad (3)$$

Из анализа полученных результатов следует, что возможности использования перелива через сливной борт для предварительного сгущения гидросмеси в накопительных аппаратах весьма ограничены: при заданных геометрических размерах аппарата, расходах твердой и жидкой фаз разгрузиться может только сравнительно тонкий слой, а использование слоя большей толщины неэффективно, поскольку большая часть твердого из такого слоя не успевает разгрузиться и уходит в слив.



1 – патрубок подачи питания; 2 – воронка; 3 – патрубок подачи смеси; 4 – подающее устройство; 5 – поток перелива; 6 – сливной борт

Рис. 2 - Схема сгустительной воронки:

Величина расхода  $\Delta Q$  определяется гидравлическими характеристиками зумпфа или сгустительной воронки, а также диаметром и количеством трубопроводов, отводящих гидросмесь, от которых зависит величина  $Q_1$ . При выбранных параметрах накопительного аппарата и распределяющих трубопроводов зумпф или сгустительная воронка способны обеспечить только определенный расход гидросмеси заданной концентрации, а остальная часть поступающей в нее пульпы будет уходить в слив. Поэтому зумпф иногда работает в ре-

жиме "без перелива", когда верхний приповерхностный слой отсутствует, и высота гидросмеси в зумпфе определяется разностью поступающего и отбираемого расходов.

Анализ процессов, протекающих в зумпфах и сгустительных воронках, показывает, что для описания этих процессов может быть использована следующая модель:

$$\frac{d\varphi}{d\zeta} = \frac{(1-\varphi)^3 \varphi^3}{\Delta_1} \frac{\frac{\pi^2 \Delta^5}{16Fr} B_1 - \frac{\lambda B_2}{(1-\varphi)^2} + B_3 \frac{9\pi \Delta^3}{Re \delta^2} \frac{(\varepsilon(1-\varphi) - \varphi)}{(1-\varphi)\varphi} + \frac{2B_4}{(1-\varphi)\varphi \Delta} \frac{d\Delta}{d\zeta}}{\varphi^4 (\varepsilon^2 \rho - 2) + \varphi^3 (5 + \varepsilon^2 (\rho - 1)) - \varphi^2 3(\rho + 1)\varepsilon^2 - \varphi(7\rho + 3) + (2\rho + 1)}; \quad (4)$$

$$\frac{d\theta}{d\zeta} = \frac{A_1 \frac{\pi^2 \Delta^5}{16Fr} + \frac{\lambda A_2}{(1-\varphi)^2} + A_3 (\varepsilon(1-\varphi) - \varphi) \frac{9\pi \Delta^3}{Re \delta^2} + 2\varepsilon^2 \frac{\Delta_1}{\Delta} \frac{d\Delta}{d\zeta}}{(1-\varphi)^3 [2\rho + 1 - \varphi\rho] \varepsilon^2 + \varphi^3 (5 - 2\varphi)}; \quad (5)$$

$$Fr = \frac{\psi^2 Q_1^2}{g D_1 S_1^2}; \quad \delta = \frac{d}{D_1}; \quad Re = \frac{Q_1 \psi D_1}{\nu S_1}; \quad \Delta = \frac{D}{D_1}; \quad \theta = \frac{p S_1^2}{\rho_l \psi^2 Q_1^2}; \quad \zeta = \frac{z}{D};$$

$$\psi = (1 - \varphi_H + \varphi_{ocb}); \quad \varepsilon = \frac{(\varphi_H - \varphi_{ocb})}{(1 - \varphi_H + \varphi_{ocb})}; \quad \Delta_1 = \varphi(\rho - 1) + 2\rho + 1; \quad \rho = \frac{\rho_s}{\rho_l};$$

$$B_1 = \varphi^2 \{2 - \rho - \rho^2\} - \varphi \{2 - \rho - 4\rho^2\} + \{7 + 2\rho - 4\rho^2\};$$

$$B_2 = 4(2\rho + 1) - (3\rho + 1)\varphi; \quad B_3 = 2\rho + 1 + (2\rho - 1)\varphi - 3\rho\varphi^2;$$

$$B_4 = (\varepsilon^2 \rho - 2)\varphi^3 + (5 - \varepsilon^2)\varphi^2 + \varepsilon^2(5\rho + 2)\varphi - \varepsilon(2\rho + 1);$$

$$B_0 = \varphi^4 (\varepsilon^2 \rho - 2) + \varphi^3 (5 + \varepsilon^2 (\rho - 1)) - \varphi^2 3(\rho + 1)\varepsilon^2 - \varphi(7\rho + 3) + (2\rho + 1);$$

$$A_1 = (1 - \varphi)^3 [2\rho + 1 - \varphi(\rho + 1)] \varepsilon^2 + \varphi^3 [2\rho + 3 + \varphi(\rho - 3)];$$

$$A_2 = (1 - \varphi)^3 (\rho + 0.5)\varepsilon^2 - 1.5\varphi^3; \quad A_3 = (1 - \varphi)^2 \rho \varepsilon^2 - \varphi^2,$$

где  $S_l$  – площадь поперечного сечения воронки на уровне  $z$ ;  $\rho_l$  и  $\rho_s$  – собственные плотности воды и твердой фазы;  $\varphi$  – текущая доля твердого в гидросмеси;  $D_1$  и  $D$  – диаметр верха воронки и диаметр текущего сечения.

При расчете параметров и режимов работы сгустительной воронки величина  $Q_1$  находится итерационным методом из решения системы уравнений (4) и (5). В этом случае давление, расход и концентрация гидросмеси в верхнем сечении зоны основного течения известны, и необходимо определить расход и концентрацию гидросмеси в отводящих трубопроводах. Расчет ведется по следующему алгоритму. Вначале из решения уравнения (4) для выбранного приближения вычисляется распределение объемной доли твердого по длине сгустительной воронки, а затем путем интегрирования уравнения (5) определяется давление на выходе из распределительных трубопроводов. Если полученное давление не равно атмосферному, то изменяется значение  $Q_1$ , и итерационный процесс повторяется еще раз.

При расчете параметров и режимов работы зумпфа гидротранспортной установки заданы давление и концентрация в верхнем сечении зоны основного течения, а также расход гидросмеси на входе в отводящий трубопровод. В этом случае расчет проводится по следующему алгоритму. Задается некоторое начальное значение концентрации гидросмеси на выходе из зумпфа а затем уравнения (4) и (5) решаются совместно до тех пор, пока значение давления не станет равным давлению, заданному в верхнем сечении. Это значение вертикальной координаты считается высотой заполнения зумпфа, для которой задано значение концентрации гидросмеси. Затем из решения уравнения (4) с новыми граничными условиями в верхнем сечении определяется распределение объемной доли твердого по высоте зумпфа, которое сравнивается с предыдущим приближением. Если полученное значение концентрации гидросмеси в нижнем сечении основной зоны течения мало отличается от значения, полученного на предыдущей итерации, то процесс завершается.

Таким образом, на основании представленных зависимостей (1) - (5) можно смоделировать параметры и режимы работы гидротранспортного комплекса с учетом процессов пульпообразования и сгущения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блюсс Б.А., Сокил А.М., Гоман О.Г. Проблемы гравитационного обогащения титан-цирконовых песков. – Днепропетровск: Поліграфіст, 1999. – 190 с.
2. Блюсс Б.А., Головач Н.А. Совершенствование технологий предобогащения ильменитовых руд. – Днепропетровск: Полиграфист, 1999. – 126 с.
3. Проблемы разработки россыпных месторождений / И.Л. Гуменик, А.М. Сокил, Е.В. Семененко и др.. – Днепропетровск: Січ, 2001. – 224 с.
4. Блюсс Б.А., Семененко Е.В. Обеспечение рационального режима работы карьерного гидротранспортного комплекса // Сборник научных трудов НГУ. - №17. – Т. 1. – Днепропетровск: РИК НГУ, 2001. – С. 228 – 233.
5. Нурок Г.А. Процессы и технология гидромеханизации открытых горных работ. - М.:Недра, 1985.- 287 с.
6. Совершенствование режимов работы гидротранспортных установок технологий углеобогащения / Е.Л. Звягильский, Б.А. Блюсс, Е.И. Назимко, Е.В. Семененко. – Севастополь: «Вебер», 2002. – 247 с.
7. Берт Р.О. Технология гравитационного обогащения/Пер. с англ.–М.:Недра,1990.–574с.