

ОСАЖДЕНИЕ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ В ШАХТНЫХ ВОДОСБОРНИКАХ

Малеев В.Б., канд. техн. наук, доц.,
Донецкий государственный технический университет

Установлено, что скорость осаждение мелкодисперсных частиц в шахтных водосборниках в значительной степени зависит от переменного коэффициента сопротивления вследствие залповых сбросов загрязненной воды и пропорциональна градиенту скорости.

Established, that the speed a deposition of finely divided fragments in mine catchement basins largely depends on a float factor of resistance owing to volley resets of a polluted water and is proportional to a velocity gradient

Известно, что наиболее рациональной является схема шахтного водоотлива с максимально возможной степенью очистки воды от твердых частиц в предварительных отстойниках [1-3]. Последние будут весьма эффективным средством борьбы с зашламляемостью водосборников только при одновременном решении вопроса удаления мелкодисперсной части твердого из водосборников, которая отстойниками не улавливается.

Удаление части шлама, неуловленного в предварительном отстойнике, может быть осуществлено путем применения технических решений, основанных на размыве осевших твердых частиц и увеличении скорости потока (по всему сечению выработки или в придонной ее части) до значений, обеспечивающих смыв твердых фракций в приемный колодец.

Периодическое осаждение частиц, или отстаивание, первоначально однородной и неподвижной смеси в гравитационном поле можно описать с помощью основных соотношений, как показано в работе [4]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho_p}{\partial t} + \frac{\partial \rho_p w_p}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\rho_p \partial w_p}{\partial t} + \frac{\rho_p w_p \partial w_p}{\partial z} = -\rho_p \left(1 - \frac{\bar{\rho}}{\bar{\rho}_p} \right) g + \rho_p F(w - w_p) - \frac{\rho_p}{\bar{\rho}_p} \frac{\partial P}{\partial z}, \quad (3)$$

$$\frac{\rho \partial w}{\partial t} + \frac{\rho w \partial w}{\partial z} + \frac{\rho_p \partial w_p}{\partial t} + \frac{\rho_p w_p \partial w_p}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial z} - (\rho_p + \rho)g, \quad (4)$$

где w , w_p , ρ , ρ_p - соответственно, скорости и плотности шахтной воды и твердых фракций в ней; z - координата, направленная противоположно ускорению силы тяжести g .

Эти уравнения применимы к случаю твердых частиц одинакового размера в пренебрежении силами вязкости, обусловленными объемным расширением. Далее рассмотрим случай несжимаемой жидкости, такой, что

$$\rho = \bar{\rho}\epsilon, \quad \rho_p = \bar{\rho}_p(1 - \epsilon), \quad (5)$$

где ϵ - объемная доля шахтной воды в потоке гидросмеси.

Уравнения (1) и (2) отражают тот факт, что по мере оседания твердых частиц конечного объема на дно водосборника вода вытесняется вверх. Уравнение (3) описывает силы, действующие на твердые частицы: подъемную силу, силу сопротивления жидкости и градиент давления. Уравнение (4) выражает общее количество движения системы. Из уравнений (1), (2) и (5) следует

$$w_p = -\frac{w\epsilon}{(1 - \epsilon)}, \quad (6)$$

т. е. по мере оседания частиц жидкость движется вверх. Исключая $\partial P/\partial z$ из уравнений (3) и (4), с учетом уравнения (6) получаем

$$\left[1 + \frac{\bar{\rho}}{\bar{\rho}_p} \left(\frac{1 - \epsilon}{\epsilon}\right)\right] \frac{\partial w_p}{\partial t} + \left[1 - \frac{\bar{\rho}}{\bar{\rho}_p} \left(\frac{1 - \epsilon}{\epsilon}\right)^2\right] w_p \frac{\partial w_p}{\partial z} - \frac{\bar{\rho}}{\bar{\rho}_p} \frac{w_p}{\epsilon^2} \left[\frac{\partial \epsilon}{\partial t} - \left(\frac{1 - \epsilon}{\epsilon}\right) w_p \frac{\partial \epsilon}{\partial z}\right] = \left[\frac{\bar{\rho}}{\bar{\rho}_p \epsilon} - \left(1 - \frac{\bar{\rho}}{\bar{\rho}_p}\right)\right] g \frac{F}{\epsilon^2} w_p. \quad (7)$$

Уравнение (7) и уравнение (2) в виде

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \frac{w_p \partial \epsilon}{\partial z} = (1 - \epsilon) \frac{\partial w_p}{\partial z} \quad (8)$$

представляют собой два независимых уравнения, определяющих $\epsilon(z, t)$ и $w_p(z, t)$ для данных начальных условий и предельного значения ϵ на дне водосборника.

Постоянную времени процесса обмена количеством движения между шахтной водой и частицей можно определить по обобщенному выражению закона Стокса

$$F \approx \frac{75}{2} \cdot \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^2} \frac{\mu}{\bar{\rho}_p a^2} \quad (9)$$

где μ - динамическая вязкость шахтной воды; a - радиус частицы.

Уравнения (7) и (8) могут быть решены только численно.

Аналитическое решение возможно для простого случая, когда $\rho_p > \rho$, $F/\varepsilon^2 = F' = \text{const}$, а столкновение частиц с дном водосборника и другими частицами у дна является неупругим. Уравнение (7) преобразуется к виду

$$\frac{\partial w_p}{\partial t} + w_p \frac{\partial w_p}{\partial z} = -g - F' w_p = \frac{dw_p}{dt} \quad (10)$$

После полного осаждения частиц в слое первоначально однородной смеси ($t = 0$) толщиной z_0 с объемной долей твердых частиц $\varphi_0 = (1 - \varepsilon_0)$ до текущего значения φ_f , требующего некоторого времени, $z_f = z_0 \cdot \varphi_0 / \varphi_f$. Скорость осаждения w_p и скорость жидкости связаны между собой соотношением

$$-\frac{w_p F'}{g} = (1 - \varepsilon^{-F't}) = \frac{w F'(1 - \varphi_0)}{\varphi_0 g},$$

а положение частицы начиная с z_{01} при $t=0$ определяется по соотношению

$$\frac{z}{z_0} = \frac{z_{01}}{z_0} - \left(\frac{g}{F' z_0} \right) t + \frac{g}{F'^2 z_0} (1 - e^{-F't}) \quad (11)$$

Эти соотношения показаны на рис. 1 для $\varphi_0 = 0,2$, $\varphi_f = 0,5$, $g/F'z_0 = 1$ и $F' = F/\varepsilon^2 = 10 \text{ сек}^{-1}$.

В данном простом случае в области АОВ на этой диаграмме сохраняется постоянное значение φ , равное 0,20; в этой области частицы оседают вниз со скоростью w_p , а жидкость вытесняется вверх со скоростью w . Выше границы АВС находится чистая жидкость, а ниже АВС частицы оседают до $\varphi = 0,50$ и $w = w_p = 0$. Время полного осаждения равно 0,694 сек. Эта диаграмма показывает, что, например, при $t = 0,5$ 40% общей высоты столба сверху заполнены чистой жидкостью, 16,5% высоты занимает пульпа с $\varphi = 0,2$, а 13,5% в основании столба заполнены осажденным слоем с $\varphi = 0,5$.

Изложенное иллюстрирует простейшее, но нетривиальное решение. В действительности необходимо учитывать соотношение (9) и рассеяние частиц.

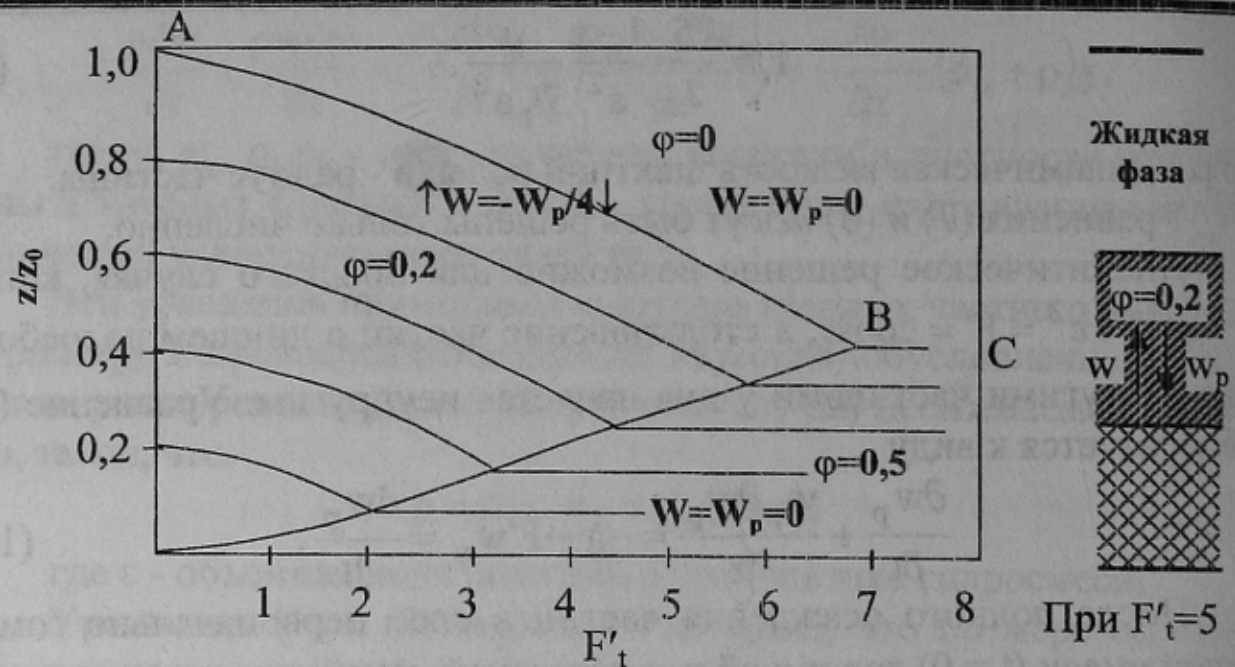


Рисунок 1 - Осаждение частиц твердого в шахтном водосборнике

При одномерном рассмотрении двухкомпонентный поток обычно характеризуется скоростью скольжения Δw_p , которая равна разности между средними скоростями компонентов и представляет собой среднюю скорость частиц относительно жидкости, или

$$\Delta w_p = \frac{w}{\phi} - \frac{w_p}{(1-\phi)}, \quad (12)$$

где w , w_p - скорости фаз на поверхности слоя. Видно, что Δw_p является функцией объемной доли твердых частиц ϕ и свойств жидкости. Уравнение (12) пригодно для спутных потоков и противотоков, восходящих и нисходящих потоков компонентов, поэтому можно ввести характеристическую скорость w_m такую, что

$$w_m = \Delta w_p \phi (1-\phi) = w_p (1-\phi) - w \phi, \quad (13)$$

которая также является инвариантом относительно w , w_p и ϕ . Уоллис [4] предложил эмпирическое соотношение

$$\Delta w_p = w_{p\infty} (1-\phi)^n, \quad (14)$$

где n - эмпирический показатель степени, а после обобщения большого числа экспериментальных данных вывел зависимость для скорости скольжения в виде

$$w_m^* = \frac{w_m}{w_{p\infty}} \phi (1 - 1,209 \phi^{2/3}). \quad (15)$$

Для неустановившегося потока Уоллис предложил вычислять скорость «скачка»

$$w_m = \frac{dw_m}{d\varphi} \tag{16}$$

как наклон кривой, показанной на рис. 2. Для неустановившегося потока в шахтных водосборниках соотношение

$$w_w - \left[(n+1)(1-\varphi)^n - (n+2)(1-\varphi)^{n+1} \right] w_{p\infty} + w_{f1} \tag{17}$$

принадлежит к типу подобных уравнений.

Применение упомянутых выше соотношений к случаю периодического осаднения шлама в водосборниках иллюстрируется рис. 3.

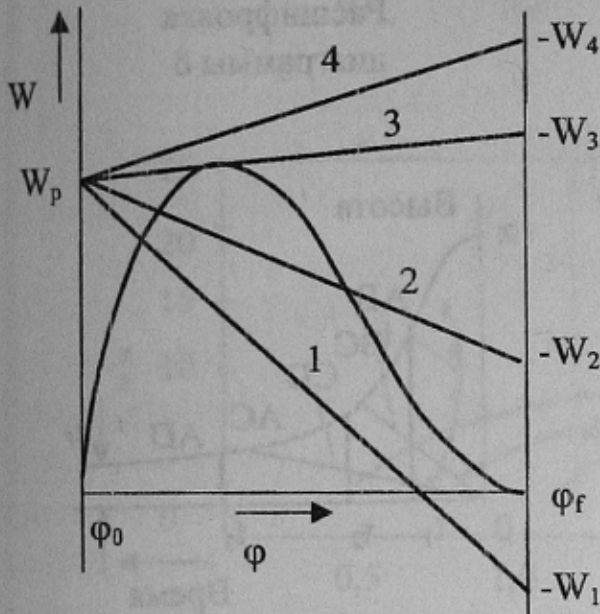


Рисунок 2 – Общая характеристика одномерного вертикального двухфазного потока: 1 – проток; 2 – противоток; 3 – точка наполнения; 4 – нет решения

дического осаднения шлама в водосборниках иллюстрируется рис. 3. На рис. 3,а показано развитие поверхности раздела в однородной смеси В с долей твердых частиц φ_0 оседающих со скоростью w_{AB} , так что в верхней части столба появляется чистая жидкость А. К моменту времени t образуются слои С и D, показанные на рис. 3,б; поверхность раздела CD перемещается со скоростью w_{BC} , как показано на соответствующих диаграммах, до тех пор, пока к моменту t_3 не будет достигнута конечная величина объемного содержания твердых частиц.

При анализе процесса осаднения в отстойниках и водосборниках установлено, что механизм этого процесса усложняется вследствие изменения скорости осаднения, вызванного изменением коэффициента сопротивления C_D в связи с изменением концентрации твердых частиц. Осаднению твердых частиц препятствуют следующие процессы: хаотическое движение компонентов со скоростью, большей конечной скорости частиц; эффект Магнуса, действующий при вращательном движении частиц в вязком слое; диссипативная сила, возникающая в процессе течения через слой частиц и вытесняющая жидкость вверх.

Установлено, что распределение концентрации по высоте потока воды в водосборнике для угля и породы и для ряда нагрузок с достаточной точностью описывается уравнением

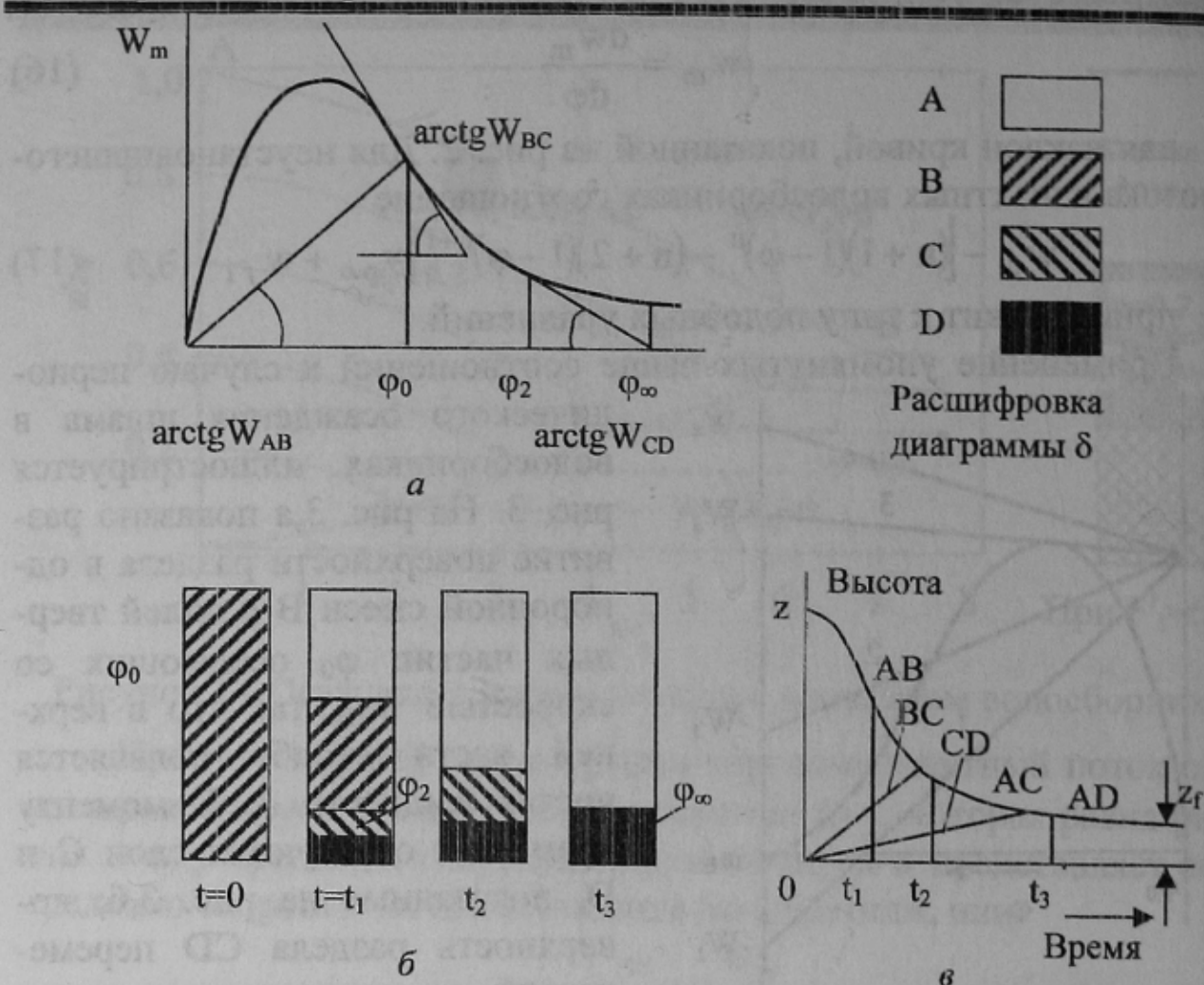


Рисунок 3 – Типичные стадии периодического осаждения частиц. а – диаграмма состояния; б – стадии осаждения; в – изменение высоты границы раздела по времени

$$\frac{1}{\rho_p} \frac{d\rho_p}{dy} = -10,4 \frac{v_{t0}}{v_*} \left(\frac{C_D}{2a} \right)^{1/2}; \quad (18)$$

здесь a , в м; y - расстояние, перпендикулярное дну водосборника от уровня воды, м; v_{t0} - скорость свободного падения, м/сек; v_* - динамическая скорость (скорость трения), м/сек; $v_* = \sqrt{\tau_0 / \rho}$, где τ_0 - среднее напряжение сдвига на стенке, кг/м². На рис. 4 показаны результаты экспериментальных исследований.

При среднем объемном содержании твердых частиц ϕ на высоте y над дном водосборника в установившемся состоянии скорость осаждения будет равна скорости турбулентного переноса

$$v_t \phi dy = -l' v_*' d\phi, \quad (19)$$

где v_t - скорость осаждения при заданном ϕ , l' - эквивалент длины пути перемешивания в смеси и v_*' - вертикальная составляющая пульсационной скорости.

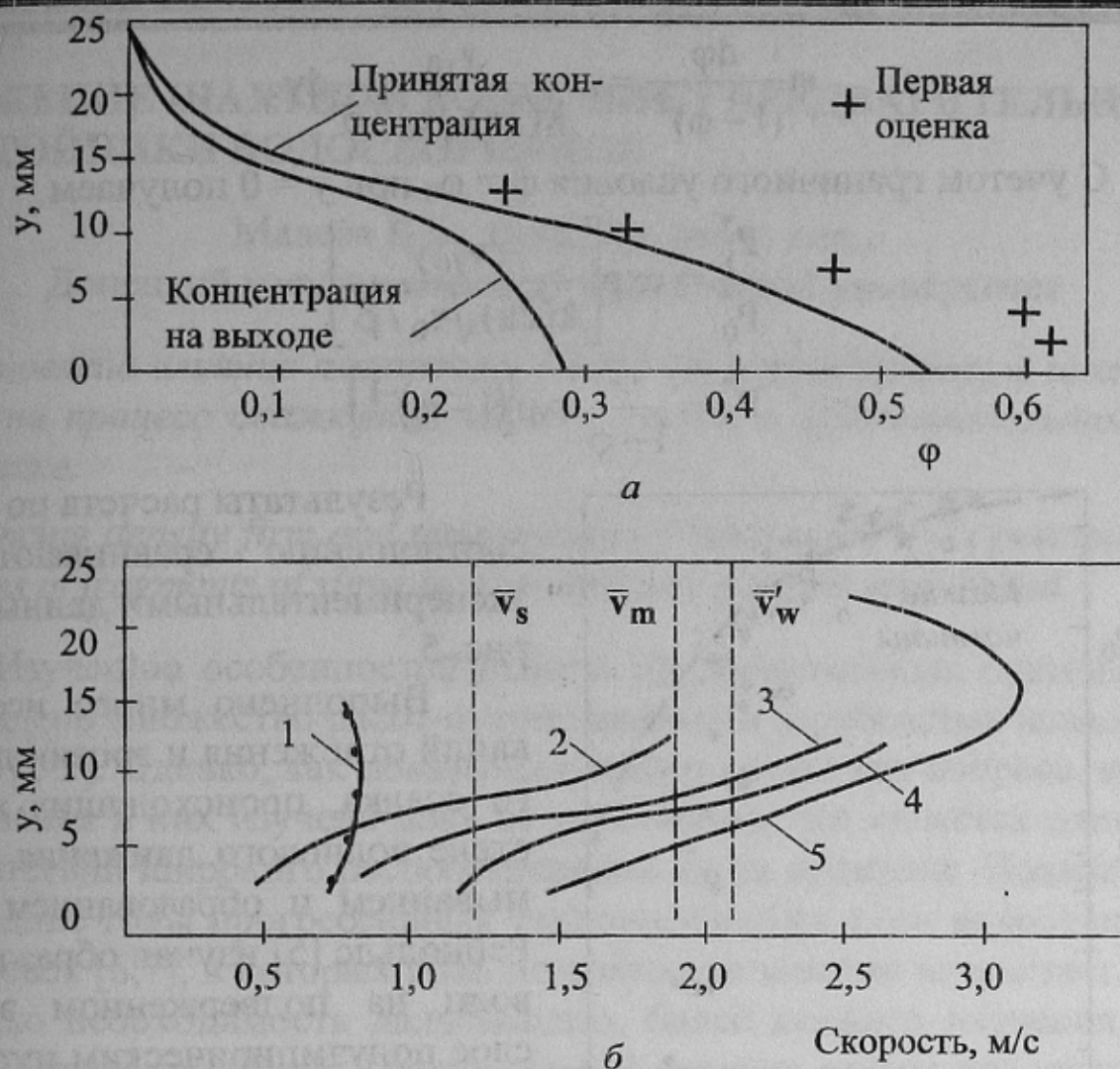


Рисунок 4 - Типичное течение с осаднением (гидравлический градиент 0,28 м/м, среднее значение $\phi = 0,10$)
 а - концентрация; б - локальные скорости; у -расстояние от дна трубы; ϕ - объемная доля твердых частиц; 1 - местная скорость скольжения; 2 - скорость твердой частицы $v_{тв}$, 3 - скорость смеси; 4 - скорректированная скорость воды v_w' ; 5- скорость воды v_w .

На основании данных Лауфера [4] вертикальная составляющая пульсационной скорости равна приблизительно динамической скорости $(\tau_0 / \bar{\rho})^{1/2} = v'_*$ за пределами ламинарного подслоя, $l' = k(2a)$, где k - постоянная величина. Далее можно использовать приближенную формулу Ричардсона и Заки [5]

$$\frac{v_t}{v_{t0}} \approx (1 - \phi)^2. \quad (20)$$

Подстановка этих величин в уравнение (19) дает

$$\varphi \frac{d\varphi}{(1-\varphi)^2} = -\frac{v_{t0}}{k(2a)\sqrt{\tau_0/\bar{\rho}}} dy. \quad (21)$$

С учетом граничного условия $\varphi = \varphi_0$ при $y = 0$ получаем

$$\frac{P_y^*}{P_0^*} = \exp\left[\frac{-v_{t0}y}{k(2a)\sqrt{\tau_0/\bar{\rho}}}\right] \quad (22)$$

при

$$P^* = \frac{\varphi}{1-\varphi} \exp\left[(1-\varphi)^{-1}\right]. \quad (23)$$

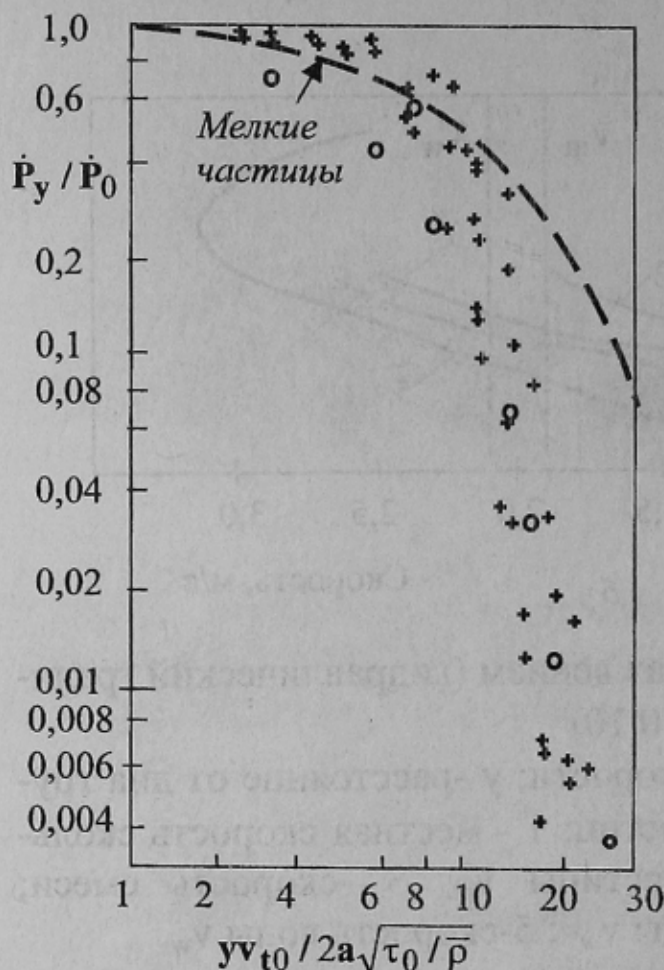


Рисунок 5 – Профиль концентрации шлама в шахтном водосборнике : + - уголь; o - порода.

Список источников.

1. Матлак Е.С., Малеев В.Б. Снижение загрязненности шахтных вод в подземных условиях. - К.: Техніка, 1991.- 136 с.
2. Малеев В.Б. Анализ способов очистки водосборников главного водоотлива. «Разработка месторождений полезных ископаемых», вып. 37, К.: Техніка, 1974.- С.69-71.
3. Заря А.Н., Малеев В.Б. Шахтные отстойники. Сборник трудов горно-электромеханического факультета ДонГТУ.- Донецк: ДонГТУ, 1996.- С.138-142.
4. Soo S.L. Fluid Dynamics of Multiphase System, Paper № 36E, A.J.ch. E Conference, Dallas, Texas (1966).
5. Reynolds A.J., J. Fluid Mach., 22, 113 (1965)

Результаты расчета по этому соотношению сравниваются с экспериментальными данными на рис. 5.

Выполнено много исследований отложения и эрозии донного осадка, происходящих вследствие волнового движения с размыванием и образованием дюн. Рейнольдс [5] изучал образование волн на подверженном эрозии слое полуэмпирическим путем на основе теории Бенджамина о течении жидкости вдоль волнистой стенки и идеи Кеннеди о запаздывании эрозионного процесса относительно изменений скорости. Уравнение Рейнольдса подтверждает основные полученные нами соотношения, согласно которым скорость отложения пропорциональна градиенту скорости.