

## ОСАЖДЕНИЕ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ В ШАХТНЫХ ВОДОСБОРНЫХ ЕМКОСТЯХ

Малеев В.Б., докт. техн. наук, проф, Холоша А.С., асс,  
Малеев А.В., инж, Удовенко С.А., асс.

Донецкий национальный технический университет

*Исследовано влияние на процесс осаждения в отстойниках и водосборниках шахтных водоотливных установок коэффициента сопротивления твердых частиц и их концентрации в шахтной воде.*

*Influence on the process of besieging in mine pumping options of coefficient of resistance of hard particles and their concentration in mine water is explored.*

**Проблема и ее связь с научными или практическими задачами.** В работах, посвященных удалению осевшего шлама из шахтных водосборников, предварительных отстойников и водоотливных канавок, процесс осаждения частиц угля и породы рассматривается в потенциальном поле при небольшой относительной скорости между ними или без относительного движения. При этом не учитывается столкновение или взаимодействие между частицами и турбулентность движения их определяется только турбулентностью жидкости. В действительности же множество частиц можно наблюдать только вследствие хаотического движения, наложенного на движение массы, как в свободномолекулярном потоке. Учет этих факторов позволит дать более точное выражение для кажущейся вязкости гидросмеси и коэффициента относительной скорости.

**Анализ исследований и публикаций.** В известных работах [1 - 5], рассмотрены лишь основные понятия и возможности осветления шахтных вод от твердых частиц первоначально в однородной и неподвижной смеси, при этом не учитывается влияние на процесс осаждения твердого течения основного потока.

**Изложение материала и результаты.** Периодическое осаждение частиц, или отстаивание, первоначально в однородной и неподвижной смеси в гравитационном поле можно описать с помощью основных соотношений:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial p V}{\partial z} = 0 . \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho_T}{\partial t} + \frac{\partial \rho_T V_T}{\partial z} = 0 . \quad (2)$$

$$\frac{\rho_T \partial V_T}{\partial t} + \frac{\rho_T V_T \partial V_T}{\partial z} = -\rho_T \left( 1 - \frac{\rho}{\rho_T} \right) g + \rho_T F (V - V_T) - \frac{\rho_T}{\rho_T} \frac{\partial P}{\partial z} . \quad (3)$$

$$\frac{\rho \partial V}{\partial t} + \frac{\rho V \partial V}{\partial z} + \frac{\rho_T \partial V_T}{\partial t} + \frac{\rho_T V_T \partial V_T}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial z} - (\rho_T + \rho) g . \quad (4)$$

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

$$\rho = \bar{\rho} \epsilon, \quad \rho_T = \bar{\rho}_T (1 - \epsilon) ,$$

Из уравнений (1) и (2) следует  $V_T = -V\epsilon/(1-\epsilon)$ , т. е. по мере оседания частиц конечного объема жидкость вытесняется вверх. Исключая  $\partial P / \partial z$  из уравнений (3) и (4), получаем

$$\left[ 1 + \frac{\rho}{\rho_T} \left( \frac{1-\epsilon}{\epsilon} \right) \right] \frac{\partial V_T}{\partial t} + \left[ 1 + \frac{\rho}{\rho_T} \left( \frac{1-\epsilon}{\epsilon} \right)^2 \right] V_T \frac{\partial V_T}{\partial z} - \frac{\rho}{\rho_T} \frac{V_T}{\epsilon^2} \left[ \frac{\partial \epsilon}{\partial t} - \left( \frac{1-\epsilon}{\epsilon} \right) V_T \frac{\partial \epsilon}{\partial z} \right] = \left[ \frac{\rho}{\rho_T \epsilon} - \left( 1 - \frac{\rho}{\rho_T} \right) \right] g \frac{F}{\epsilon^2} V_T . \quad (5)$$

Уравнения (2) и (5) в виде  $\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \frac{V_T \partial \epsilon}{\partial z} = (1-\epsilon) \frac{\partial V_T}{\partial z}$  представляют собой два независимых уравнения, определяющих  $\epsilon(z, t)$  и  $V_T(z, t)$  для данных начальных условий и предельного значения  $\epsilon$  на дне водосборника и шламособорника.

Постоянную времени процесса обмена количеством движения между шахтной водой и частицей можно определить по обобщенному выражению закона Стокса  $F \approx \frac{75}{2} \cdot \frac{(1-\epsilon)}{\epsilon^2} \frac{\mu}{\rho_T a^2}$ . Аналитическое решение уравнения (5) возможно для простого случая, когда  $\rho_T > \rho$ ,  $F/\epsilon = F' = const$ , а столкновение частиц с дном водосборника и другими частицами у дна является неупругим:

$$\frac{\partial V_T}{\partial t} + \frac{V_T \partial V_T}{\partial z} = -g - F' V_T = \frac{dV_T}{dt} . \quad (6)$$

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  $\varphi_f$ , требующего некоторого времени,  $z_f=Z_0\varphi_0/\varphi_f$ , скорость осаждения частиц  $V_T$  и скорость жидкости  $V$  связаны между собой соотношением  $-\frac{F'V_T}{g} = (1-\varepsilon^{-F't}) = \frac{VF'(1-\varphi_0)}{\varphi_0g}$ , а по-

ложение частицы начиная с  $Z_{01}$  при  $t=0$  определяется по соотношению  $\frac{z}{z_0} = \frac{z_{01}}{z_0} - \left(\frac{g}{F'z_0}\right)t + \frac{g}{F'^2z_0}(1 - e^{-F't})$ . 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  $\varphi$ , равное 0,20; в этой области частицы оседают вниз со скоростью  $V_T$ , а жидкость вытесняется вверх со скоростью  $V$ . Выше границы АВС находится чистая жидкость, а ниже АВС частицы оседают до  $\varphi=0,50$  и  $V=V_T=0$ . 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 рассеяние частиц. При одномерном рассмотрении двухкомпонентный поток обычно характеризуется скоростью скольжения  $\Delta V_T$ , которая равна

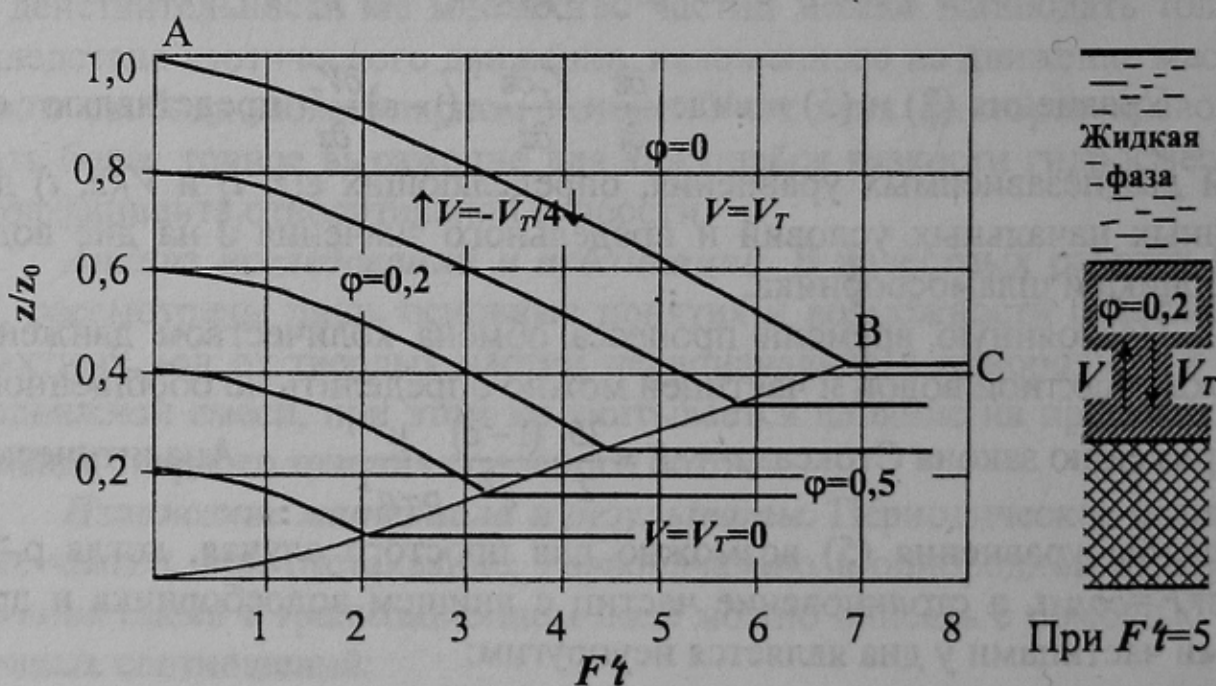


Рис. 1 – Осаждение частиц твердого в шахтном водосборнике и шламоотстойнике

разности между средними скоростями компонентов и представляет собой среднюю скорость частиц относительно жидкости, или  $\Delta V_T = \frac{V}{\varphi} - \frac{V_T}{(1-\varphi)}$ . Видно, что  $\Delta V_T$  является функцией объемной доли

твердых частиц  $\varphi$  и свойств жидкости. Уравнение пригодно для спутных потоков и противотоков, восходящих и нисходящих потоков компонентов, поэтому можно ввести характеристическую скорость  $V_m$  такую, что  $V_m = \Delta V_T \varphi (1-\varphi) = V_T (1-\varphi) - V\varphi$ , которая также является инвариантом относительно  $V$ ,  $V_T$  и  $\varphi$ . Уоллис [6] предложил эмпирическое соотношение  $\Delta V_T = V_{T\infty} (1-\varphi)^n$ , а после обобщения большого числа экспериментальных данных вывел зависимость для скорости скольжения в виде  $V_m^* = \frac{V_m}{V_{T\infty}} \varphi (1 - 1,209\varphi^{2/3})$ . Для неустановившихся потоков, к числу которых относятся и потоки в шламособорниках, водосборниках и предварительных отстойниках, скорость скольжения можно вычислить по подобному соотношению:

$$V_m = \left[ (n+1)(1-\varphi)^n - (n+2)(1-\varphi)^{n+1} \right] V_{T\infty} + V f_1.$$

Применение упомянутых выше соотношений к случаю периодического осаждения шлама в водосборниках иллюстрируется рис. 2. На рис. 2,а показано развитие поверхности раздела в однородной смеси В с долей твердых частиц  $\varphi_0$  оседающих со скоростью  $V_{AB}$ , так что в верхней части столба появляется чистая жидкость А. К моменту времени  $t$  образуются слои С и D, показанные на рис. 2,б; поверхность раздела CD перемещается со скоростью  $V_{BC}$  как показано на соответствующих диаграммах, до тех пор, пока к моменту  $t_3$  не будет достигнута конечная величина объемного содержания твердых частиц в осадке. Обоснованность этого общего метода будет показана далее, при рассмотрении процесса осаждения взвешенных твердых частиц в предварительном отстойнике и в водосборниках при работающих насосах водоотлива, когда процесс осаждения происходит с противопотоком, т.е. течение шахтной воды с осаждением твердого. При анализе процесса осаждения в отстойниках и водосборниках установлено, что механизм этого процесса усложняется вследствие изменения скорости осаждения, вызванного изменением коэффициента  $C_D$  в связи с изменением концентрации твердых частиц. Осаждению 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 другого твердого с достаточной точностью описывается уравнением

$$\frac{1}{\rho_T} \frac{d\rho_T}{dy} = -10,4 \frac{V_{f0}}{V_*} \left( \frac{C_D}{2a} \right)^{1/2}; \quad (7)$$

здесь  $y$  - расстояние, перпендикулярное дну водосборника от уровня воды;  $V_{f0}$  - скорость свободного падения;  $V_*$  - динамическая скорость (скорость трения);  $V_* = \sqrt{\tau_0 / \rho}$ , (здесь  $\tau_0$  - среднее напряжение сдвига на стенке).

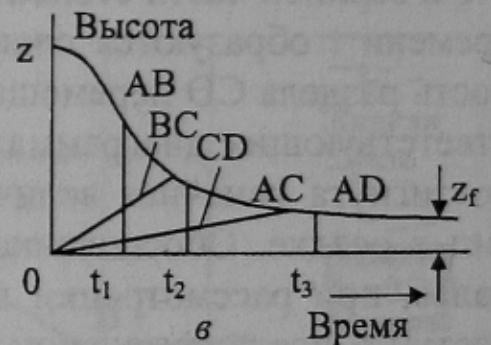
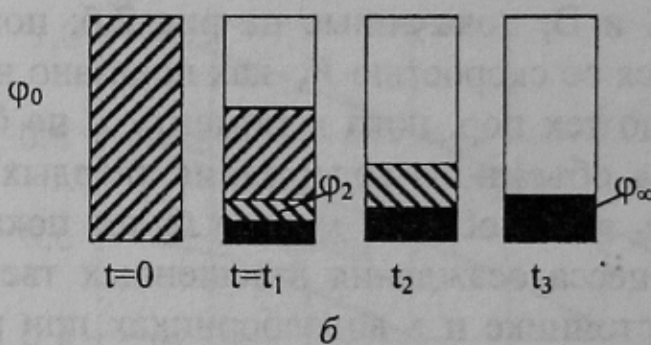
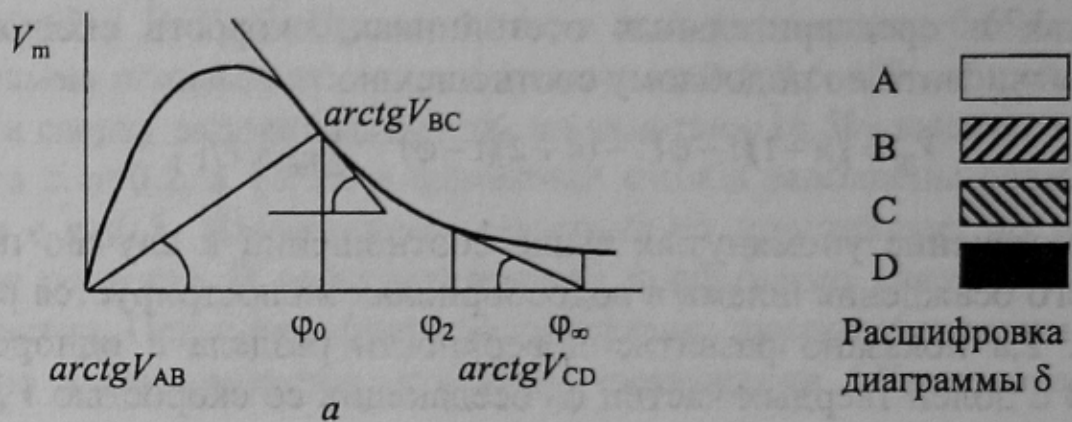


Рис. 2 – Типичные стадии периодического осаждения частиц:  
а – диаграмма состояния; б – стадии осаждения; в – изменение высоты границы раздела по времени

На рис. 3 показаны результаты экспериментальных исследований. При среднем объемном содержании твердых частиц  $\phi$  на высоте  $y$  над дном водосборника в установившемся состоянии скорость осаждения будет равна скорости турбулентного переноса

$$V_t \varphi dy = -l' V_*' d\varphi. \tag{8}$$

На основании данных Лауфера [7] вертикальная составляющая пульсационной скорости  $V_*'$  равна приблизительно динамической скорости  $(\tau_0/\rho)^{1/2} = V_*'$  за пределами ламинарного подслоя,  $l' = k(2a)$ . Далее можно использовать приближенную формулу Ричардсона и Заки [8]:

$$\frac{V_t}{V_{t0}} \approx (1 - \varphi)^2.$$

Подстановка этих величин в уравнение (8) дает

$$\varphi \frac{d\varphi}{(1 - \varphi)^2} = -\frac{V_{t0}}{k(2a)\sqrt{\tau_0/\rho}} dy. \tag{9}$$

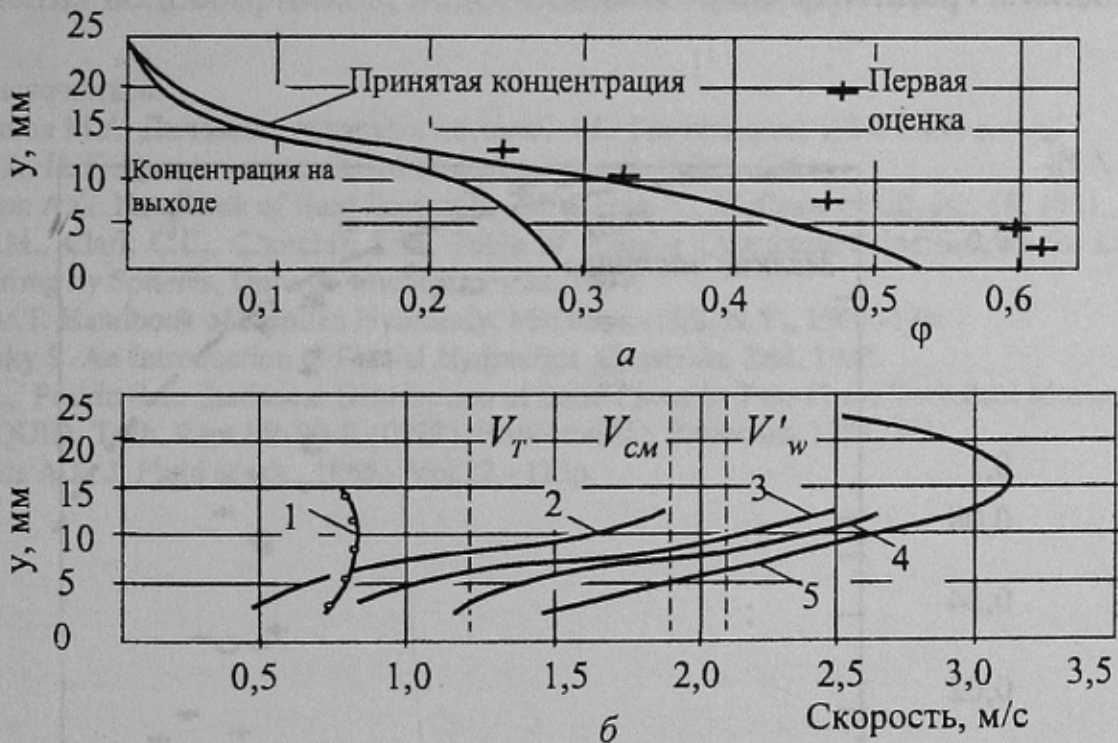


Рис. 3 – Типичное течение с осаждением (гидравлический градиент 0,28 м/м, среднее значение  $\varphi = 0,10$ )

а - концентрация; б - локальные скорости; у - расстояние от дна выработки;

$\varphi$  - объемная доля твердых частиц;

1 - местная скорость скольжения;

2 - скорость твердой частицы  $V_T$ ;

3 - скорость смеси  $V_{см}$ ;

4 - скорректированная скорость воды  $V'_w$ ;

5 - скорость воды  $V_w$ .

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

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

или

$$P^* = \frac{\varphi}{1 - \varphi} = \exp\left[(1 - \varphi)^{-1}\right]. \quad (10)$$

Результаты расчета по этому соотношению сравниваются с экспериментальными данными на рис. 4.

Уравнение Рейнольдса [8] подтверждает основные полученные нами соотношения, согласно которым скорость отложения пропорциональна градиенту скорости.

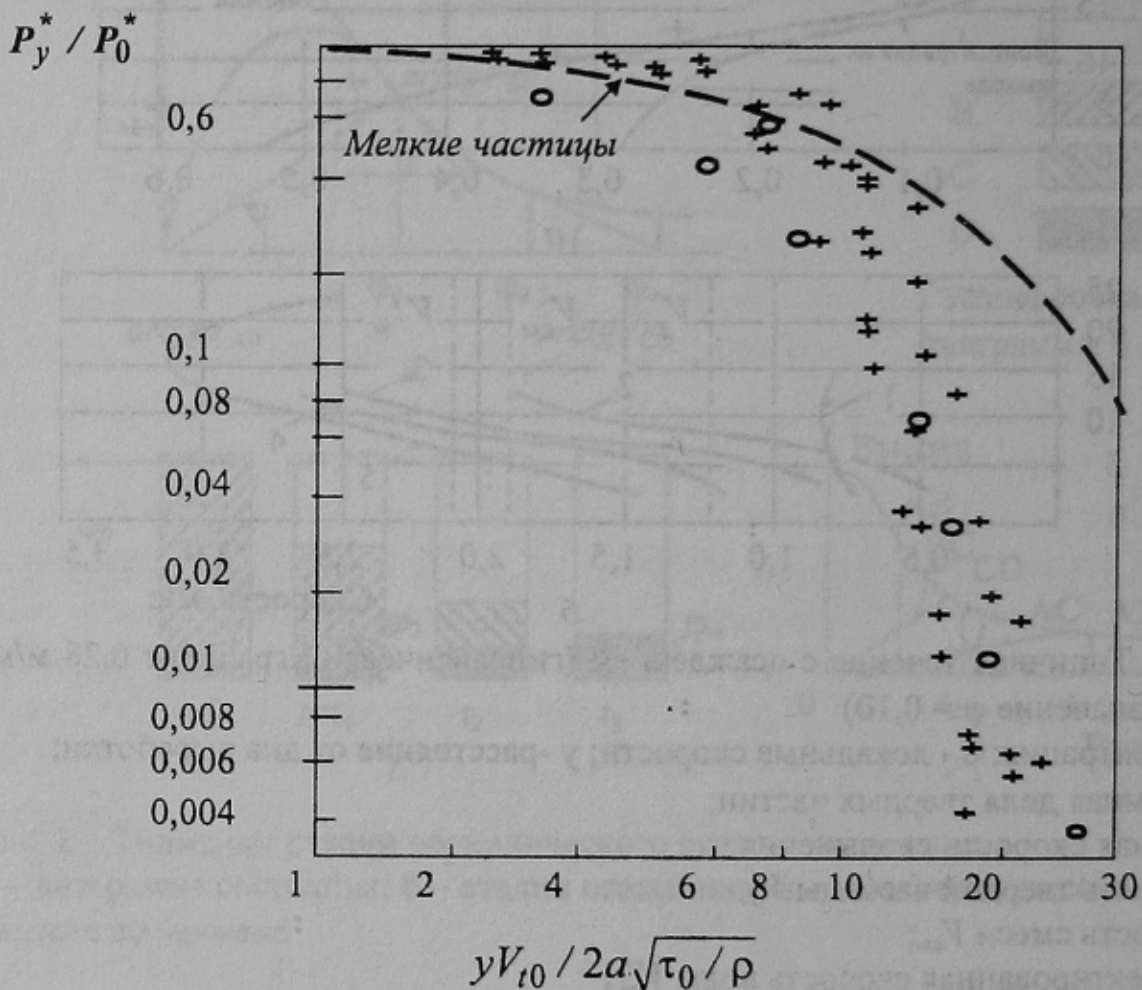


Рис. 4 – Профиль концентрации шлама в шахтном водосборнике :  
+ - уголь; o - порода.

**Выводы:**

1. Процесс осаждения шлама в шахтных водосборных емкостях усложняется из-за изменения коэффициента сопротивления частиц в связи с меняющейся концентрацией твердого в шахтной воде.

2. Осаждению твердых частиц препятствуют следующие процессы: хаотическое движение компонентов со скоростью, большей конечной скорости частиц; эффект Мангуса, действующий при вращательном движении частиц в вязком слое; диссипативная сила, возникающая в процессе течения через слой частиц и вытесняющая жидкость вверх.

3. Распределение концентрации твердого по высоте потока воды в водосборнике позволяет достаточно точно определить время зашламления водосборников, водоотливных канавок.

## Список источников:

1. Великанов М.А. Динамика русловых потоков. -М.: Гостехиздат, 1954. - 434 с.
2. Юфин А. П. Гидромеханизация. -М.: Госстройиздат, 1965. - 496 с.
3. Anderson A.G. Handbook of fluid Dynamics, ed. streeter V., McGraw – Hill, sec. 18, 1961.
4. Chu C.M., Clark C.C., Churchill S.W. Table of Angulsr Distribution Coefficients for Light – Scattering by Spheres, Univ. of Michigan Press, 1957.
5. Chow V.T. Handbook of Applied Hydrolofy. McGraw – Hill. N.Y., 1964.-17p.
6. Yeliavsky S. An Introduction to Fluvial Hydraulics, Constable, Znd, 1955.
7. Soo S.I., Peskin R.L. Statistical Distribution of Solid Phase in Two-Phase Turbulent Motion, Project SQUID, Tech. Rept PR-80-R (ONR), Princeton U., Princeton, 1958.-N.I.
8. Reynolds A.J., J. Fluid Mach., 1965.- Vol.22.- 113p.