

## Збезводнювання та сушіння. Водно-шламове господарство

обозначена буквой F.

### *Выводы:*

1. Приведена методика построения точки на графике кривой осаждения, соответствующей средней скорости осаждения частиц твердой фазы на выбранном временном интервале при исследовании разделительных процессов в сгустительных аппаратах.

2. Изложен уточненный метод графического определения момента начала уплотнения осадка на кривой осаждения.

### Список литературы

1. Оборудование для обогащения угля: Справочное пособие / Под редакцией Б.Ф. Братченко, М.: Недра. – 1979.
2. **Смирнов В.И.** Курс высшей математики. – М.: Наука, 1967. – Т.1.

© Спинеєв В.А., 2005

*Надійшла до редколегії 30.03.2005 р.  
Рекомендовано до публікації д.т.н. О.Д. Полуляхом*

УДК 622.753:622.648.24

**Б.А. Блюсс**, д-р техн. наук,

**Е.В. Семененко**

(Украина, Днепропетровск, Институт геотехнической механики),

**В.Д. Шурыгин**, канд. техн. наук

(Украина, Вольногорск, Вольногорский государственный горно-металлургический комбинат)

## **РАСЧЕТ ОБЛАСТЕЙ МИГРАЦИИ ЧАСТИЦ ПОЛИДИСПЕРСНОГО РАЗНОПЛОТНОСТНОГО МАТЕРИАЛА ПО СЕЧЕНИЮ ТРУБОПРОВОДА ПРИ НАПОРНОМ ГИДРОТРАНСПОРТЕ**

Перемещение твердых частиц напорным потоком жидкости широко применяется в технологиях обогащения минерального сырья [1–5]. Как для процессов транспортирования по трубопроводам, так и для процессов сепарации в обогатительных аппаратах существенное значение имеет транспортирующая способность потока и высота, на которую он способен взвешивать твердые частицы. От этой высоты зависит не только режим гидротранспортирования, но и характер износа внутренней поверхности трубопровода, а также эффективность работы таких аппаратов, как конусные и

струйные сепараторы [1, 2]. Течение гидросмеси со скоростями, при которых происходит выпадение твердых частиц на дно, недопустимо для гидротранспорта, а взвешивание частиц на большую высоту приводит к ухудшению показателей разделения. Поэтому задача исследования высоты миграции частиц в напорном потоке является актуальной при расчетах гидравлических сетей для технологий обогащения, и ей посвящено ряд работ [6–12]. Эти исследования направлены на определение средних и пульсационных скоростей твердых частиц с учетом действующих на них сил Бассэ, Магнуса, Сафмена, Архимеда, сил инерционной природы, связанных с наличием присоединенных масс, а также силы аэродинамического сопротивления и силы тяжести. Однако в этих работах не рассматривают вопрос оценки взвешивающей способности потока по величине высоты миграции на основании анализа сил, действующих на частицу со стороны жидкости [3–5].

Целью данной статьи – исследование высоты миграции частиц различной плотности в напорном потоке в зависимости от скорости и концентрации гидросмеси на основании анализа сил, действующих на одиночную частицу твердого материала, выраженных через осредненные параметры течения.

Для описания движения одиночной частицы в горизонтальном потоке жидкости выберем следующую систему координат. Ось ОХ направим вдоль потока и будем называть это направление осевым, ось ОУ – вертикально вверх и будем называть это направление вертикальным. В принятой системе координат полагая, что при течении в цилиндрической трубе вертикальная пульсация жидкости описывается периодической зависимостью [1], а также что разница между осевыми скоростями жидкости и частицы пропорциональна гидравлической крупности частицы, [10–12, 14], было получено решение уравнение Чена для движения твердой частицы диаметром от 0,25 до 3 мм в вертикальном направлении [12, 15]:

$$v_p = V_o \sqrt{\frac{10\theta^2 + 9 + \sqrt{2\theta}(9 + 3\theta)}{(a^2 + 9)\theta^2 + 9 + \sqrt{2\theta}(9 + 3a\theta)}} \sin(\omega t - \varphi_o) + w_S \Phi \quad ; \quad (1)$$

$$w_S = \frac{gd^2}{18\nu} Ar \quad ; \quad a = 1 + \frac{2}{3} Ar \quad ; \quad tg\varphi_o = \frac{3(a-1)\theta(1 + \sqrt{0,5\theta})}{a\theta^2 + 9(1+\theta) + 3\sqrt{2\theta}(3 + a\theta)} \quad ; \quad \theta = 5\sqrt{\frac{\lambda}{8}} \delta^2 Re \quad ;$$

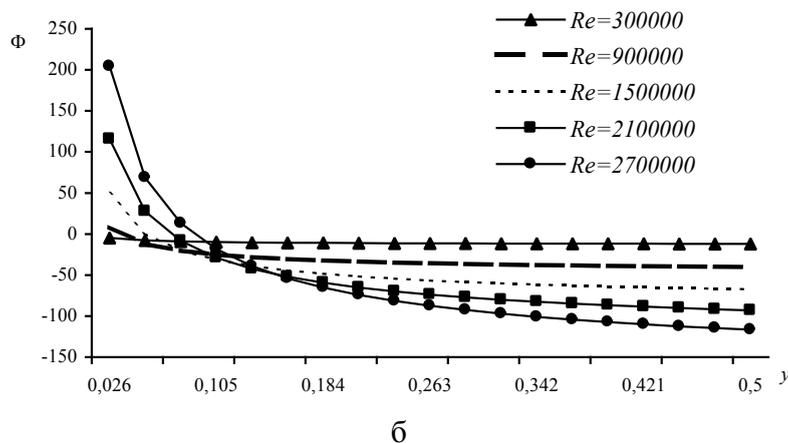
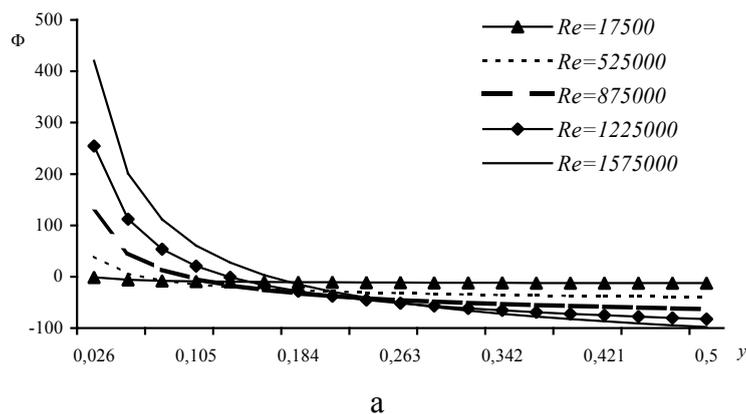
$$\delta = \frac{d}{D} \quad ; \quad Ar = \frac{\rho_p - \rho_f}{\rho_f} \quad ; \quad Re = \frac{u_{cp} D}{\nu} \quad ; \quad Fr = \frac{u_{cp}^2}{gD} \quad ;$$

$$\Phi = \sqrt{\frac{Fr Re}{Ar} \left( \frac{9,86 \lg^{-2/3}(0,147 Re)}{y^{2/3} \sqrt[6]{\delta}} + \frac{3,52 \lg^{-1/2}(0,147 Re)}{\sqrt{y\delta}} \right) - 1} \quad ,$$

## Збезводнювання та сушіння. Водно-шламове господарство

где  $v_p$  – скорость частицы;  $V_o$  – максимальное значение пульсации вертикальной скорости;  $\omega$  – лагранжева частота турбулентных пульсаций;  $t$  – время;  $g$  – ускорение свободного падения;  $d$  – диаметр частицы;  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости жидкости;  $D$  – диаметр трубопровода;  $\rho_f$  – плотность жидкости;  $\rho_p$  – плотность материала частицы;  $u_{cp}$  – средняя по сечению скорость жидкости;  $Y$  – расстояние по вертикали от дна потока.

Из формулы (1) следует, что частица будет взвешиваться потоком, т. Е. Двигаться вверх под воздействием турбулентных пульсаций, если величина  $\Phi$  положительна, и будет осаждаться на дно потока, если эта величина меньше нуля. Таким образом, величина  $\Phi$  может рассматриваться как мера взвешивающей способности потока [13]. Анализ зависимости этой величины от параметров потока и свойств твердой частицы показывает, что для рассматриваемых частиц существуют области, где  $\Phi$  больше и меньше нуля, т. Е. Эти частицы концентрируются в нижней части потока, причем размер этой зоны зависит от скорости жидкости и диаметра частиц (см. рис. 1).



## Збезводнювання та сушіння. Водно-шламове господарство

Рис. 1. Распределение  $\Phi$  по сечению трубопровода при  $D$  и  $d$ ,  
соответственно 0,35; 0,0029 (а) и 0,6; 0,0017 (б)

Зависимость (1) получена для движения одиночной частицы в потоке жидкости и условно применима для описания течения гидросмеси с малой концентрацией твердого материала ( $\sigma \leq 0,05$ ), когда взаимное влияние частиц друг на друга пренебрежимо мало [3 – 5, 7 – 9].

Полученный результат был обобщен для случая течения гидросмеси, образованной из частиц диаметром более и менее 0,25 мм [13]. Анализ среднего за период турбулентной пульсации значения силы, действующей на частицу в вертикальном направлении, показывает, что эта величина будет больше нуля, если выполняется условие [12, 15]

$$(a_1 \text{Re}^{2/3} + a_2 \text{Re}^{1/2} - \zeta_G^P) \left( \frac{2}{3} b_1 \text{Re}^{2/3} + \frac{b_2}{2} \text{Re}^{1/2} \right) \geq (1 - a_o \cos \varphi_o) b_o \frac{G(1-G)(1-2G)}{y_*^2(1-y_*)^2}; \quad (2)$$

$$a_o = \frac{4\delta_P}{3} \sqrt{\frac{5\pi}{2} \frac{10\theta^2 + 9\zeta_v^C + 3\sqrt{20\zeta_v^C(3\zeta_v^C + \theta)}}{(a^2 + 9)\theta^2 + 9\zeta_v^C + 3\sqrt{20\zeta_v^C(3\zeta_v^C + a\theta)}}} \left( \frac{\lambda}{8} \right)^{1/4} \sqrt{\frac{\text{Re}}{\zeta_v^C}};$$

$$\text{Ar}^P = \frac{\rho_P - \rho_o}{\rho_o};$$

$$a_1 = 9,81 \frac{k\zeta_\Omega^C \zeta_w^P \sqrt{\zeta_G^P}}{\sqrt[6]{\delta_P} \sqrt{\text{Ar}Gm}} \left( \frac{\lambda}{G^2} \right)^{1/3}; \quad a_2 = 2,89 \frac{k\zeta_w^P \sqrt{\zeta_G^P}}{\sqrt{\delta_P} \text{Ar}Gm} \left( \frac{\lambda}{G^2} \right)^{1/4}; \quad \zeta_c^P = \frac{0,186 + \sigma}{0,435 - \sigma} \frac{1}{\zeta_d^P};$$

$$b_o = 162 \left( \frac{\chi_o \text{Re}}{\delta_P \text{Ar}Gm \zeta_G^P} \left( 1 + \sqrt{\frac{R_C S}{\text{Ar}^C}} \right) \right)^2; \quad b_1 = 9,81 \frac{k\zeta_\Omega^C \zeta_w^P \sqrt{\zeta_G^P}}{\sqrt[6]{\delta_P} \sqrt{\text{Ar}Gm}} \left( \frac{\lambda}{G^5} \right)^{1/3};$$

$$\theta = 5 \sqrt{\frac{\lambda}{8}} \delta_P^2 \text{Re};$$

$$b_2 = 2,89 \left( \frac{\lambda}{G^6} \right)^{1/4} \frac{k\zeta_w^P \sqrt{\zeta_G^P}}{\sqrt{\delta_P} \text{Ar}Gm}; \quad \varphi_o = \arctg \left( \frac{3(a-1)\theta \left( \sqrt{\zeta_v^C} - \sqrt{0,5\theta} \right) \sqrt{\zeta_v^C}}{a^2\theta^2 + 9\left( \zeta_v^C + \theta \right) + 3\sqrt{20\zeta_v^C} \left( \zeta_v^C + a\theta \right)} \right);$$

$$\lambda = \frac{0,308}{\lg^2 \left( \frac{0,148 \text{Re}}{\zeta_v^C} \right)}; \quad Gm = \frac{gD^3}{v_o^2}; \quad a = 1 + \frac{2}{3} \text{Ar}^P \zeta_G^P; \quad \zeta_G^P = \frac{1 - \frac{\text{Ar}^C}{\text{Ar}^P} R_C \sigma}{1 + \text{Ar}^C R_C \sigma}; \quad \delta_P = \frac{d_P}{D};$$

## Збезводнювання та сушіння. Водно-шламове господарство

$$\zeta_w^C = (1 - \delta_C^{3/2})(1 - \sigma)^n; \quad \zeta_w^P = (1 - \delta_P^{3/2})(1 - \sigma)^n; \quad \zeta_M^C = \zeta_G^C \zeta_w^C \zeta_\Omega^C; \quad Ar^C = \frac{\rho_C - \rho_o}{\rho_o}$$

$$\zeta_v^C = \frac{1 + Ar^C R_C \sigma}{1 + 2,5 R_C \sigma + 10,05 R_C^2 \sigma^2}; \quad \zeta_\Omega^C = \sqrt[3]{\zeta_v^C \left( \frac{0,186 + \sigma}{0,435 - \sigma} \right)^{2/3}}; \quad \zeta_S^P = \zeta_w^P \sqrt{\zeta_v^C \zeta_G^P};$$

$$\zeta_d^C = \frac{(1 + Ar^C R_C \sigma)(1 - \delta_C^{3/2})(1 - \sigma)^n}{1 + 2,5 R_C \sigma + 10,05 R_C^2 \sigma^2}; \quad \zeta_d^P = \frac{(1 + Ar^C R_C \sigma)(1 - \delta_P^{3/2})(1 - \sigma)^n}{1 + 2,5 R_C \sigma + 10,05 R_C^2 \sigma^2};$$

$$\delta_C = \frac{d_C}{D};$$

$$\zeta_c^C = \frac{0,186 + \sigma}{0,435 - \sigma} \frac{1}{\zeta_d^C}; \quad \zeta_S^C = \zeta_G^C \zeta_w^C \sqrt{\zeta_v^C}; \quad \zeta_G^C = \frac{1 - R_C \sigma}{1 + Ar^C R_C \sigma}; \quad \zeta_M^P = \zeta_w^P \zeta_\Omega^C \sqrt{\zeta_G^P},$$

где  $G$  – максимально допустимая высота миграции частиц;  $\bar{y}^*$  – безразмерная высота максимума осевой скорости потока;  $Ar^P, Ar^C$  – параметр Архимеда, соответственно, для частицы диаметром более и менее 0,25 мм;  $\chi_o$  – отношение средней величины вертикальной пульсации к средней скорости при турбулентном течении воды в круглой трубе ( $\chi_o = 0,05$ );  $\rho_o, \rho_P, \rho_C$  – плотность, соответственно, воды, частиц диаметром более 0,25 мм и менее 0,25 мм;  $R_C$  – объемная доля частиц диаметром менее 0,25 мм в транспортируемом материале;  $d_P, d_C$  – крупность, соответственно, частиц диаметром более и менее 0,25 мм;  $\sigma$  – концентрация гидросмеси;  $\nu_o$  – кинематическая вязкость воды.

Итак, если на некоторой высоте по сечению трубопровода, условие (2) выполняется, то частицы рассматриваемого материала могут быть подняты до этой высоты турбулентными пульсациями потока, если же нет, то частицы данного материала не могут быть подняты потоком до этой точки при данных параметрах. Величины параметров, при которых неравенство (2) обращается в равенство, считаются предельными для рассматриваемых условий.

Относительное расстояние от нижней стенки трубопровода, на котором неравенство (2) обращается в равенство, будем называть границей области миграции частиц.

Для условий гидротранспортного комплекса и обогатительной фабрики Вольногорского горно-металлургического комбината (ВГМК) с помощью зависимости (2) были проведены исследования границ области миграции

## Збезводнювання та сушіння. Водно-шламове господарство

частиц (рис. 2 и 3). Расчеты выполнялись при следующих условиях:  $\rho_C = 2300$  кг/м<sup>3</sup>;  $d_P = 2,5$  мм;  $d_C = 0,5$  мм;  $R_P = 40\%$ ;  $R_C = 60\%$ ;  $D = 0,6$  м;  $1 \leq \sigma \leq 41\%$ ;  $0,5 \leq V_0 \leq 10,5$  м.

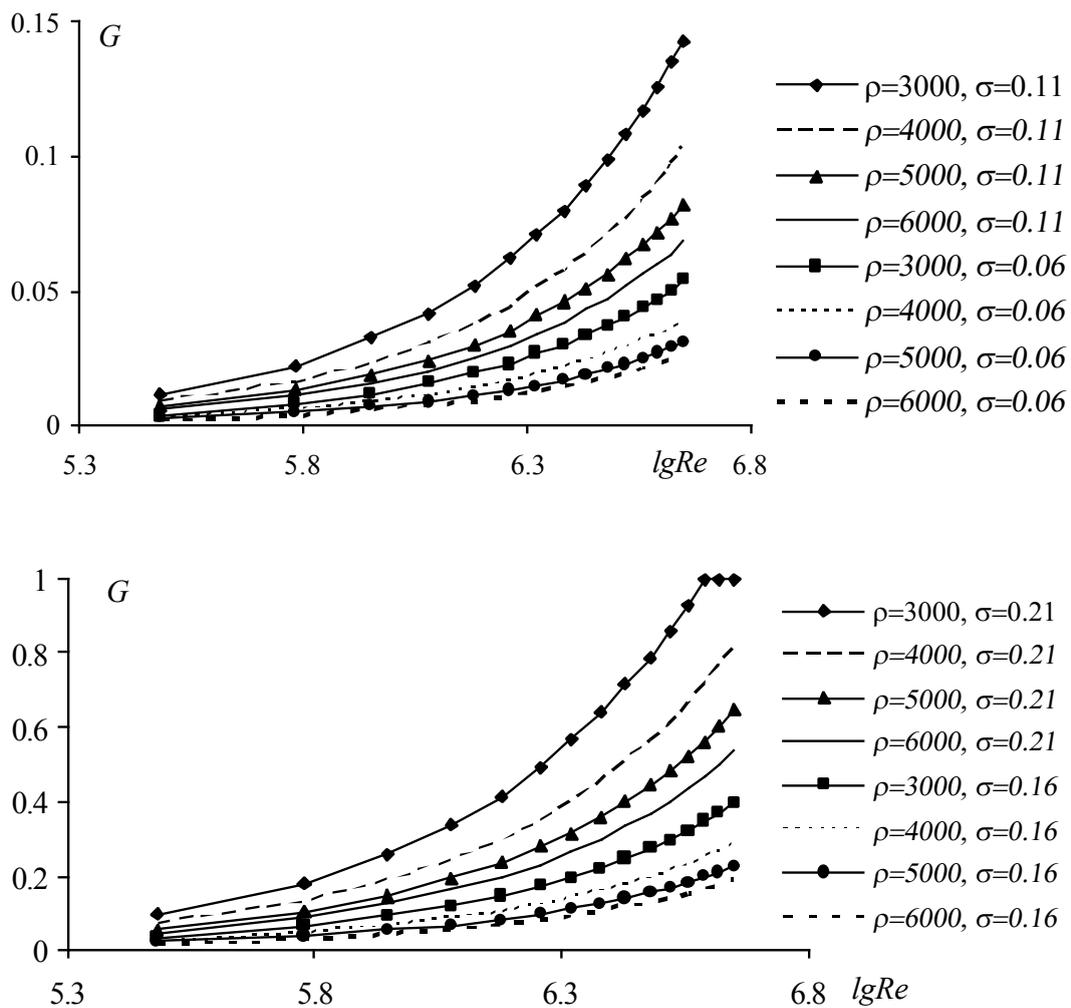


Рис. 2. Зависимость высоты миграции частиц разной плотности от числа Рейнольдса для гидросмеси разной концентрации

Таким образом, на основании приведенных формул можно рассчитать максимально возможную высоту миграции транспортируемых частиц. С этой

## Збезводнювання та сушіння. Водно-шламове господарство

целью были разработаны алгоритмы и методики расчетов, а также создан программный пакет для моделирования режимов гидротранспортирования полидисперсных разнофракционных гидросмесей, который внедрен на ВГМК, в Донецком государственном техническом университете, Днепропетровском национальном университете, Национальном горном университете, Донбасском государственном металлургическом институте.

### Список литературы

1. Совершенствование режимов работы гидротранспортных установок технологий углеобогащения / **Е.Л. Звягильский, Б.А. Блюсс, Е.И. Назимко, Е.В. Семененко.** – Севастополь: Вебер, 2002. – 247 с.
2. Проблемы разработки россыпных месторождений / **И.Л. Гуменик, А.М. Сокил, Е.В. Семененко, В.Д. Шурыгин.** – Днепропетровск: Січ, 2001. – 224 с.
3. **Смолдырев А.Е.** Гидро- и пневмотранспорт в металлургии. – М.: Металлургия, 1985. – 383 с.
4. **Дмитриев Г.П., Махарадзе Л.И., Гочиташвили Т.Ш.** Напорные гидротранспортные системы. – М.: Недра, 1991. – 304 с.
5. **Нурок Г.А.** Процессы и технологии гидромеханизации открытых горных работ. – М.: Недра, 1985. – 583 с.
6. **Медников Е.П.** Турбулентный перенос и осаждение аэрозолей. – М.: Недра, 1981. – 175 с.
7. **Шрайбер А.А., Милютин В.Н., Яценко В.П.** Гидромеханика двухкомпонентных потоков с твердым полидисперсным веществом. – К.: Наук. думка, 1980. – 252 с.
8. Турбулентные течения газозвеси / **А.А. Шрайбер, Л.Б. Гавин, В.А. Наумов, В.П. Яценко.** – К.: Наук. думка, 1987. – 240 с.
9. Теория и прикладные аспекты гидротранспортирования твердых материалов / **И.А. Асауленко, Ю.К. Витошкин, В.М. Карасик, С.И. Криль, В.Ф. Очеретько.** – К.: Наук. думка, 1981. – 364 с.
10. Гидротранспорт (вопросы гидравлики) / **Н.А. Силин, Ю.К. Витошкин, В.М. Карасик, В.Ф. Очеретько** – К.: Наук. думка, 1971. – 158 с.
11. **Фоменко Т.Г.** Гравитационные процессы обогащения полезных ископаемых. – М.: Недра, 1966. – 332 с.
12. **Семененко Е.В.** Определение критической скорости гидротранспортирования путем оценки взвешивающей способности потока // Горн. электромеханика и автоматика: Науч.-техн. сб. – 2004. – № 72. – С. 129 – 135.
13. **Альтшуль А.Д.** Гидравлические сопротивления. – М.: Недра, 1970. – 216 с.
14. **Курганов А.М., Федоров Н.Ф.** Справочник по гидравлическим расчетам систем водоснабжения и канализации. – Л.: Стройиздат, 1973. – 408 с.
15. **Гоман О.Г., Семененко Е.В., Семененко П.В.** Исследование взвешивающей способности потоков гидросмеси малой концентрации // Збагачення корисних копалин: науково-технічний збірник. – 2003. Вип. 16(57). – С. 66 – 72.

© Блюсс Б.А., Семененко Е.В., Шурыгин В.Д., 2005

*Надійшла до редколегії 15.04.2005 р.*