УДК 622.753:622.648.24

Е.В. СЕМЕНЕНКО, канд. техн. наук, ИГТМ НАН Украины

РАЗДЕЛЕНИЕ ПОЛИДИСПЕРСНЫХ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ ПО ПЛОТНОСТИ И КРУПНОСТИ ПРИ НАПОРНОМ ГИДРОТРАНСПОРТИРОВАНИИ

На основі дослідження руху твердої частинки в турбулентному напірному потоці рідини зроблено оцінку можливості її зависання на різній відстані від дна трубопроводу. Встановлено, що зависання частинок крупністю від 0,25 до 3 мм можливо лише на відстані від дна трубопроводу, що не перебільшує деяку величину, яка є границею зависання. Це створює можливість сепарації цих частинок з потоку. Досліджено залежність границі зависання від критерію Рейнольдса, густини та концентрації матеріалу, що транспортується.

On the basis of research of firm particle movement in vortical forcing flow of a liquid has been made an estimation of an opportunity of its lag on different distance from bottom of the pipeline. It has been established, that the lag of particles with size from 0,25 up to 3 mm has been possible only on distance from bottom of the pipeline, which hasn't exceeded deffinite size, which is border of lag. It has created an opportunity of separation of these particles from a flow. The dependence of lag border on criterion Reynoldse, density and concentration of a material which is transported has been investigated .

Введение. Напорные взвесенесущие потоки широко используются в различных технологиях измельчения и разделения для транспортировки твердых частиц различной крупности и плотности [1 – 5]. Обычно для этого используют трубопроводы круглого поперечного сечения, изготовленные из металла, полиэтилена или поливинилхлорида [3, 5]. Энергоемкость процессов дробления и измельчения существенно зависит от гранулометрического состава и эффективности разделения материала, поступающего в технологический аппарат, по крупности и плотности [3, 5]. Поскольку при движении по трубопроводу транспортируемый материал стратифицируется по высоте сечения, это может быть использовано для его предварительного разделения в виде пульповых потоков перед процессами измельчения, дробления и сепарации [3 – 5]. Однако для этого требуется научно обоснованная методика расчета высоты установки в трубопроводе делителя потока.

Основная часть известных исследований, проводимых в области гидротранспорта, направлена на установление зависимости критической скорости гидротранспортирования от параметров твердых частиц и характеристик трубопровода, а также зависимости гидравлического уклона в сверхкритических и критических режимах течения от концентрации и скорости пульпы [3, 5]. Известные исследования параметров течения в режимах со слоем заиления малочисленны и в основном посвящены движению с плотным высококонцентрированным донным слоем [4]. Промежуточные режимы течения напорных взвесенесущих потоков, когда частицы образуют в нижней части трубопровода подвижный неплотный слой, практически не изучены [3 – 5].

В немногих работах предпринята попытка рассмотреть такие режимы течения экспериментально [6, 7], а также, основываясь на различных предположениях, использовать для расчета распределения концентрации пульпы по высоте потока систему параболических или гиперболических уравнений [7, 8]. Однако экспериментальные результаты ограничены усло-виями проведения опытов, параболические уравнения предполагают равно-мерное распределение твердых частиц по потоку, а гиперболические не учитывают в должной степени параметры частиц и трубопровода. Кроме того, ни один из этих подходов не раскрывает зависимости возможной высоты взвешивания частиц от параметров течения и транспортируемого материала.

Известны исследования, направленные 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 [9 – 11]. Однако в этих работах не рассматривается вопрос оценки взвешивающей способности потока и величины потолка взвешивания на основании анализа сил, действующих на частицу со стороны жидкости [12 – 14].

Целью данной статьи является определение потолка взвешивания частиц различной плотности в напорном взвесенесущем потоке в зависимости от скорости и концентрации гидросмеси на основании анализа сил, действующих на одиночную частицу твердого материала, выраженных через осредненные параметры течения.

Для анализа основных сил, определяющих потолок взвешивания частиц, рассмотрим случай движения одиночной частицы в напорном потоке жидкости [12 – 14]. Примем следующую систему координат: ось OX направим вдоль потока и будем называть это направление осевым, ось OY направим вертикально вверх и будем называть это направление вертикальным. В принятой системе координат уравнение движения твердой частицы в вертикальном направлении имеет вид [9 – 14]

$$\frac{\pi}{6}d^3\left(\rho_p+\frac{\rho_f}{2}\right)\frac{dv_p}{dt}+3\pi\mu d v_p+\frac{3}{2}d^2\sqrt{\pi\rho_f\mu}\int_0^t\frac{dv_p}{dt}\frac{dx}{\sqrt{t-x}}=$$
$$=\frac{\pi}{4}d^3\rho_f\frac{dv_f}{dt}+3\pi\mu d v_f+\frac{3}{2}d^2\sqrt{\pi\rho_f\mu}\int_0^t\frac{dv_f}{dt}\frac{dx}{\sqrt{t-x}}+F_\Sigma \quad ;(1)$$

$$F_\Sigma=C_m d^3\rho_f\left(u_f-u_p\right)\Omega+1.61d^3\rho_f\left(u_f-u_p\right)\sqrt{\nu\frac{du_f}{dy}}-\frac{\pi}{4}d^3g\left(\rho_p-\rho_f\right), \quad (2)$$

где d – диаметр частицы; ρ_p – плотность частицы; ρ_f – плотность жидкости; μ – динамический коэффициент вязкости жидкости; v_f – вертикальная скорость жидкости; v_p – вертикальная скорость частицы; t – время; C_m – коэффициент силы Магнуса [10, 11]; u_f – осевая скорость жидкости; u_p – осевая скорость частицы; Ω – угловая скорость вращения частицы [10, 11]; ν – коэффициент кинематической вязкости жидкости; C_x – коэффициент силы сопротивления [9, 15]; g – ускорение свободного падения; y – расстояние по вертикали от дна потока.

В принятой системе координат в предположении, что при течении в цилиндрической трубе вертикальная пульсация жидкости описывается периодической зависимостью $v_f=V_o\sin\omega t$ [7, 9], а также что разница между осевыми скоростями жидкости и частицы пропорциональна гидравлической крупности частицы [5, 10, 11], было получено решение уравнения Чена для движения твердой частицы диаметром от 0,25 до 3 мм в вертикальном направлении [12 – 14, 16]

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

$$\Phi=\sqrt{\frac{Fr\,\mathrm{Re}}{Ar}}\left(\frac{\lg^{-2/3}(0{,}147\mathrm{Re})}{0.101\bar{y}^{2/3}\sqrt[6]{\xi}}+\frac{\lg^{-1/2}(0{,}147\mathrm{Re})}{0.284\sqrt{\bar{y}\xi}}\right)-1;$$

$$w_S=\frac{gd^2}{18\nu}Ar;\ a=1+\frac{2}{3}Ar;\ tg\varphi_o=\frac{3(a-1)\beta\left(1+\sqrt{0{,}5}\beta\right)}{a\beta^2+9(1+\beta)+3\sqrt{2}\beta(3+a\beta)};$$

$$\beta=5\sqrt{\frac{\lambda}{8}}\xi^2\,\mathrm{Re};\ \xi=\frac{d}{D};\ Ar=\frac{\rho_p-\rho_f}{\rho_f};\ \mathrm{Re}=\frac{u_{cp}D}{\nu};\ Fr=\frac{u_{cp}^2}{gD},$$

где V_o – максимальное значение пульсации вертикальной скорости; μ – лагранжева частота турбулентных пульсаций; D – диаметр трубопровода; u_{cp} – средняя по сечению скорость жидкости.

Величина w_S, полученная сопоставлением суммарной силы $F_р$ и силы Стокса, показывает, с какой скоростью относительно жидкости должна двигаться частица, чтобы эти две силы уравновешивали друг друга. Аналитически формула для w_S тождественна формуле, по которой рассчитывается гидравлическая крупность частиц диаметром 0 – 0,25 мм. Для таких частиц величины w_S и гидравлическая крупность совпадают. Для частиц большей крупности эти величины различны.

Анализ зависимости (3) показывает, что вертикальная скорость частицы при движении в напорном потоке по круглому трубопроводу складывается из двух слагаемых, одно из которых не изменяется с течением времени, а второе описывает колебания по периодическому закону около стационарного значения. Следовательно, возрастание или снижение средней величины v_p определяется знаком и величиной $F_р$, которая является равнодействующей сил, действующих на частицу со стороны жидкости.

Из формулы (3) следует, что частица будет взвешиваться потоком, то есть двигаться вверх под воздействием турбулентных пульсаций, если величина Ф положительна, и будет осаждаться на дно потока, если эта величина меньше нуля. Таким образом, величина Ф может рассматриваться как характеристика взвешивающей способности потока [12 – 14]. При этом расстояние от дна потока, при котором величина Ф равна нулю, и будет потолком взвешивания частиц, поскольку выше этого расстояния данный поток эту частицу взвесить не способен. Очевидно, что установка делителя потока выше потолка взвешивания позволит разделить поток на два, причем в нижнем потоке будут находиться все рассматриваемые частицы. Проанализируем зависимость величины Ф от параметров потока и свойств твердой частицы.

Входящее в выражение (2) скольжение скорости частицы, то есть разница между осевыми скоростями жидкости и частицы, при течении в горизонтальных трубах пропорционально гидравлической крупности частицы, т.е. скорости ее осаждения в неограниченной жидкости [5, 9 – 11, 15]

$$u_f - u_p = w_o (1 - \pm)^q, \qquad (4)$$

где w_o – скорость осаждения частицы в неограниченной жидкости; ± – объемная концентрация частиц в потоке; q – показатель степени, изменяющийся в диапазоне от 1 до 2 [5].

Гидравлическая крупность частиц во многом определяется их размерами. Для частиц диаметром 0 – 0,25 мм гидравлическая крупность вычисляется по формуле Стокса, а для частиц диаметром 0,25 – 3 мм – по формуле Ретингера [15]. Для реттингеровских частиц силы Магнуса и Сафмена могут быть представлены в безразмерном виде

$$\bar{F}_M = 8.97k\,\frac{\sqrt{ArFr}}{\sqrt[3]{\mathrm{Re}}\,\sqrt[6]{\text{¢}}}\left(\frac{d\bar{u}_f}{d\bar{y}}\right)^{2/3};\ \bar{F}_S = 3.08k\sqrt{\frac{ArFr}{\mathrm{Re}\,\text{¢}}}\sqrt{\frac{d\bar{u}_f}{d\bar{y}}};\ \frac{d\bar{u}_f}{d\bar{y}} = \frac{D}{u_{cp}}\frac{du_f}{dy}, \quad (5)$$

где k – коэффициент в формуле Реттингера (k=1.634…1.741) [15].

При вычислении производной в формулах (5) предполагалось, что величина u_f изменяется по логарифмическому закону. При этом для вычисления коэффициента гидравлического сопротивления трения λ была выбрана формула, соответствующая трубам, отшлифованным гидросмесью, $\text{a} = a/\lg^2(b\,\mathrm{Re})$ a=0.30864 и b=0.14678 [5, 17].

Поскольку в данной работе рассматривается течение со скоростями выше критической, то при дальнейших исследованиях предполагалось, что параметры вязкого подслоя не оказывают влияния на движение твердых частиц [5, 9].

С учетом формул (4) и (5) величину Ф для рассматриваемых частиц можно определить по формуле

$$\Phi = \frac{8.97k}{\sqrt[6]{\text{¢}}\,\sqrt[3]{\mathrm{Re}}}\sqrt{\frac{Fr}{Ar}}\left(\frac{\wp}{\bar{y}}\sqrt{\frac{\text{a}}{8}}\right)^{2/3} + 3.08k\sqrt{\frac{Fr}{Ar\text{¢}\,\mathrm{Re}}}\sqrt{\frac{\wp}{\bar{y}}\sqrt{\frac{\text{a}}{8}}} - 1;\ \text{где} \quad (6)$$

$$\wp = \begin{cases} 5.0, & \bar{y} < \dfrac{30}{\mathrm{Re}}\sqrt{\dfrac{8}{\text{a}}} \\ 2.5, & \bar{y} > \dfrac{30}{\mathrm{Re}}\sqrt{\dfrac{8}{\text{a}}} \end{cases}.$$

Расчеты, произведенные по формуле (6), показывают, что для рассматриваемых частиц существуют области, где Ф больше и области, где Ф меньше нуля, то есть эти частицы концентрируются в нижней части потока, причем размер этой зоны зависит от скорости жидкости и диаметра частиц (см. рис. 1 и 2).

а)

б)

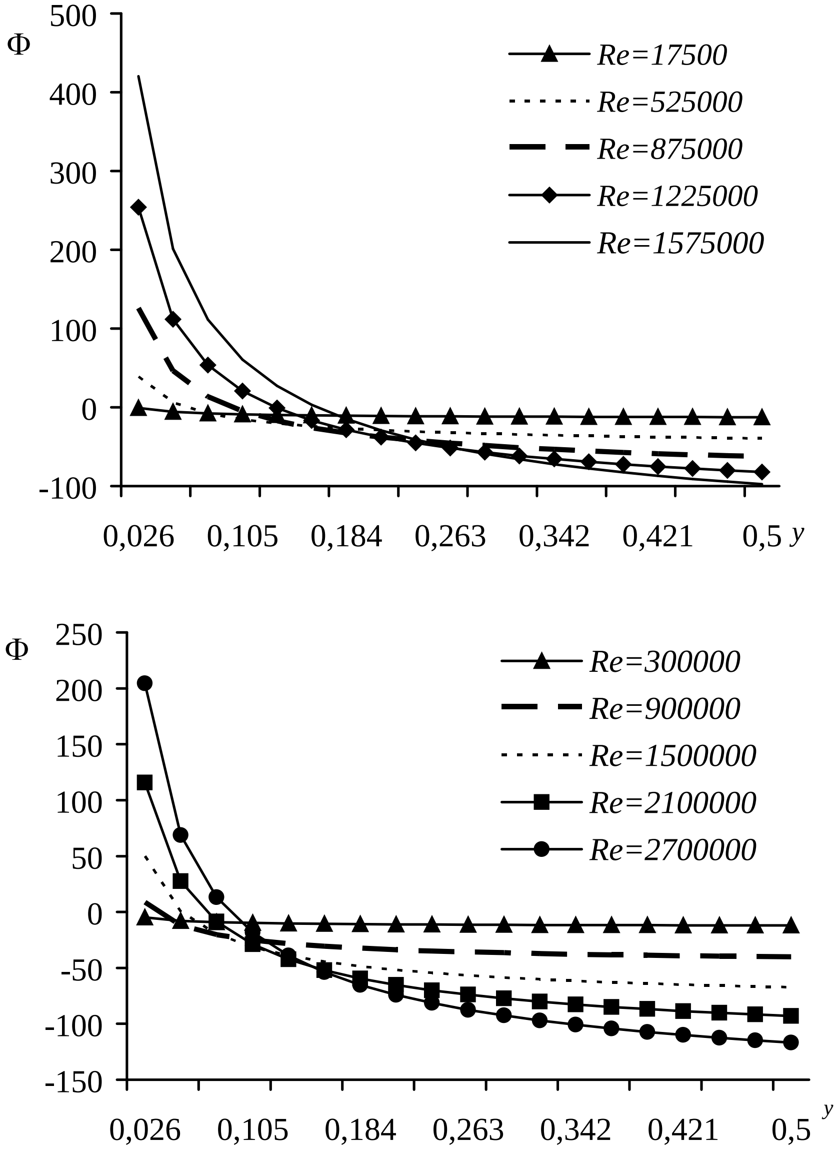
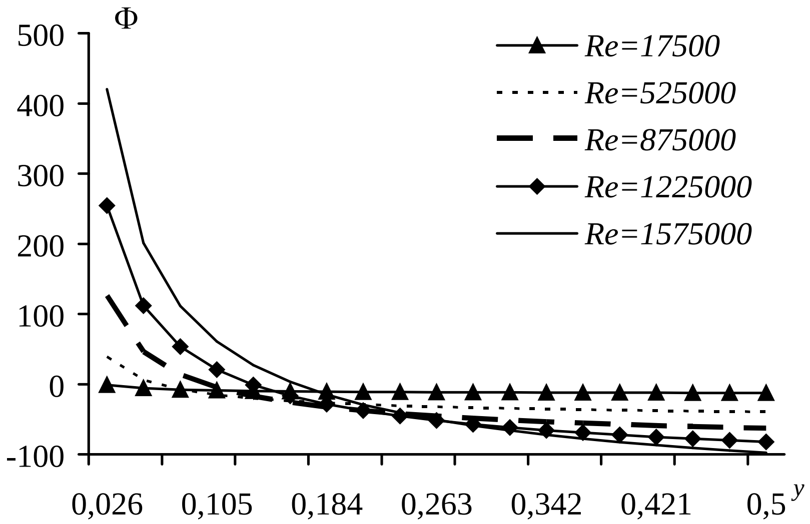


Рис. 1. Распределение Ф по сечению трубопровода при *D* и *d*, соответственно равных 0,35; 0,0029 (а) и 0,6; 0,0017 (б)

Зависимость (1) получена для движения одиночной частицы в потоке жидкости и условно применима для описания течения гидросмеси с малой концентрацией твердого материала ($\pm \le 0{,}05$), когда взаимное влияние частиц друг на друга пренебрежимо мало [3 – 5, 9 – 11].

а)



б)

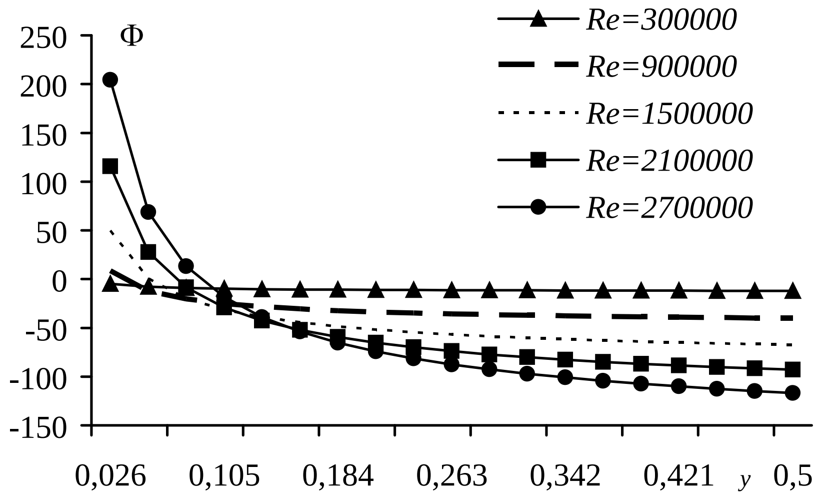


Рис. 2. Распределение Φ по сечению трубопровода при
а – D = 0,35 и d = 0,0029; б – D = 0,6 и d = 0,0017;
в – D = 0,85 и d = 0,0012.

Полученный результат был обобщен для случая течения гидросмеси, образованной из частиц диаметром более и менее 0,25 мм [3]. 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 – 14]

$$\left(a_1 \mathrm{Re}^{2/3} + a_2 \mathrm{Re}^{1/2} - \text{¸}_G^{P}\right)\left(\frac{2}{3} b_1 \mathrm{Re}^{2/3} + \frac{b_2}{2}\mathrm{Re}^{1/2}\right) \ge \left(1 - a_o \cos \text{¨}_o\right) b_o \Gamma ; \qquad (7)$$

$$a_o = \frac{4\text{¢}_P}{3}\sqrt{\frac{5\text{®}}{2}\,\frac{10^{-2} + 9\text{¸}_{\neg}^{C\,2} + 3\sqrt{2^{-}\text{¸}_{\neg}^{C}}\left(3\text{¸}_{\neg}^{C} + ^{-}\right)}{\left(a^2 + 9\right)^{-2} + 9\text{¸}_{\neg}^{C\,2} + 3\sqrt{2^{-}\text{¸}_{\neg}^{C}}\left(3\text{¸}_{\neg}^{C} + a^{-}\right)}}\left(\frac{\text{a}}{8}\right)^{1/4}\sqrt{\frac{\mathrm{Re}}{\text{¸}_{\neg}^{C}}} ;$$

$$\Gamma=\frac{G(1-G)(1-2G)}{\bar{y}_*^2(1-\bar{y}_*)^2};\ Ar^P=\frac{°_P-°_o}{°_o};\ ¸_c^P=\frac{0{,}186+±}{0{,}435-±}\frac{1}{¸_d^P};\ -=5\sqrt{\frac{ª}{8}¢_P^2}\,\mathrm{Re};$$

$$a_1=9{,}81\frac{k¸_Ω^C¸_w^P\sqrt{¸_G^P}}{\sqrt[6]{¢_P}\sqrt{ArGm}}\left(\frac{ª}{G^2}\right)^{1/3};\ a_2=2{,}89\frac{k¸_w^P\sqrt{¸_G^P}}{\sqrt{¢_P ArGm}}\left(\frac{ª}{G^2}\right)^{1/4};\ ¢_P=\frac{d_P}{D};$$

$$b_o=162\left(\frac{¡_o\,\mathrm{Re}}{¢_P ArGm¸_G^P}\left(1+\sqrt{\frac{R_C S}{Ar^C}}\right)\right)^2;\ b_1=9.81\frac{k¸_Ω^C¸_w^P\sqrt{¸_G^P}}{\sqrt[6]{¢_P}\sqrt{ArGm}}\left(\frac{ª}{G^5}\right)^{1/3};$$

$$b_2=2{,}89\left(\frac{ª}{G^6}\right)^{1/4}\frac{k¸_w^P\sqrt{¸_G^P}}{\sqrt{¢_P ArGm}};\ Ar^C=\frac{°_C-°_o}{°_o};\ ª=\frac{0{,}308}{\lg^2\left(\frac{0{,}148\,\mathrm{Re}}{¸_¬^C}\right)};$$

$$¨_o=arctg\left(\frac{3(a-1)¯\left(\sqrt{¸_¬^C}-\sqrt{0{,}5¯}\right)\sqrt{¸_¬^C}}{a^{2¯2}+9\left(¸_¬^{C2}+¯\right)+3\sqrt{2¯¸_¬^C}\left(¸_¬^C+a¯\right)}\right);\ Gm=\frac{gD^3}{¬_o^2};$$

$$¸_w^C=\left(1-¢_C^{3/2}\right)(1-±)^n;\ ¸_w^P=\left(1-¢_P^{3/2}\right)(1-±)^n;\ ¸_M^C=¸_G^C¸_w^C¸_Ω^C;$$

$$¸_¬^C=\frac{1+Ar^C R_C±}{1+2{,}5R_C±+10{,}05R_C^2±^2};\ ¸_Ω^C=\sqrt[3]{¸_¬^C}\left(\frac{0{,}186+±}{0{,}435-±}\right)^{2/3};$$

$$¸_d^C=\frac{\left(1+Ar^C R_C±\right)\left(1-¢_C^{3/2}\right)(1-±)^n}{1+2{,}5R_C±+10{,}05R_C^2±^2};\ ¸_d^P=\frac{\left(1+Ar^C R_C±\right)\left(1-¢_P^{3/2}\right)(1-±)^n}{1+2{,}5R_C±+10{,}05R_C^2±^2};$$

$$¢_C=\frac{d_C}{D};\ ¸_S^P=¸_w^P\sqrt{¸_¬^C¸_G^P};\ ¸_M^P=¸_w^P¸_Ω^C\sqrt{¸_G^P};\ a=1+\frac{2}{3}Ar^P¸_G^P;$$

$$¸_c^C=\frac{0{,}186+±}{0{,}435-±}\frac{1}{¸_d^C};\ ¸_S^C=¸_G^C¸_w^C\sqrt{¸_¬^C};\ ¸_G^P=\frac{1-\frac{Ar^C}{Ar^P}R_C±}{1+Ar^C R_C±};\ ¸_G^C=\frac{1-R_C±}{1+Ar^C R_C±},$$

где G – потолок взвешивания частиц; $\bar{y}_*$ – безразмерная высота максимума осевой скорости потока [5]; Ar^P, Ar^C – параметр Архимеда соответственно для частицы диаметром более и менее 0,25 мм; $¡_o$ – отношение средней величины вертикальной пульсации к средней скорости при турбулентном течении воды в круглой трубе ($¡_o=0{,}05$); $°_o$, $°_P$, $°_C$ – 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; $\neg_o$ – кинематическая вязкость воды.

Итак, если на некоторой высоте по сечению трубопровода условие (7) выполняется, то частицы данного материала могут быть подняты до этой высоты турбулентными пульсациями потока, если же нет, то при данных параметрах частицы этого материала не могут быть подняты потоком до этой точки. Величины параметров, при которых неравенство (7) обращается в равенство, считаются предельными для рассматриваемых условий.

Для условий гидротранспортного комплекса и обогатительной фабрики Вольногорского горно-металлургического комбината (ВГМК) с помощью зависимости (7) были проведены исследования границ области миграции частиц (рис. 3).

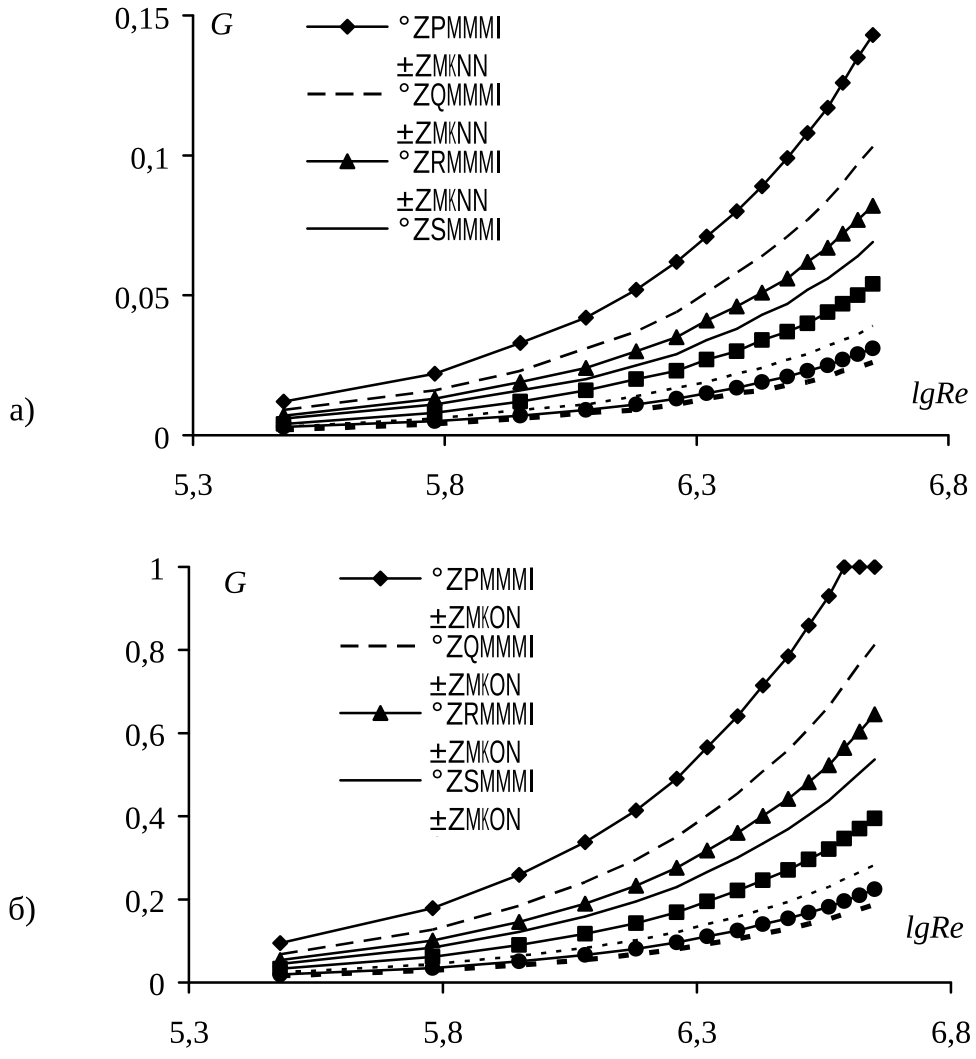


Рис. 3. Зависимость высоты миграции частиц разной плотности от числа Рейнольдса для разных концентраций гидросмеси

Расчеты выполнялись при следующих условиях: $\circ_C$ =2300 кг/м^3; d_P =2,5 мм; d_C =0,5 мм; R_P =40%; R_C =60%; $D = 0{,}6$ м; $1 \le \pm \le 41\%$; $0{,}5 \le V_0 \le 10{,}5$ м.

Анализ результатов расчетов (см. рис. 3) показывает, что для расчетов с инженерной точностью зависимость потолка взвешивания частиц от числа Рейнольдса, плотности и концентрации транспортируемого материала можно аппроксимировать следующей функцией:

$$G = \frac{N}{\circ^{M}\ \mathrm{Re}^{0.912}}; \qquad (8)$$

$$N = 201144 - 931813\pm\ ; M = 0.5915 + 1.481\pm - 80.32\pm^{2}.$$

Выводы. В работе впервые разработана и научно обоснована методика определения потолка взвешивания частиц различной плотности в напорном взвесенесущем потоке в зависимости от скорости гидросмеси, плотности и концентрации транспортируемого материала. Эта методика впервые позволяет оценить потолок взвешивания частиц на основании анализа сил, действующих на одиночную частицу твердого материала, выраженных через осредненные параметры течения. С использованием данной методики возможен расчет высоты установки делителя потока непосредственно на выходе из трубопровода, обеспечивающей сепарацию частиц крупностью более 0.25 мм. Методика положена в основу алгоритма и программного обеспечения расчетов режимов гидротранспортирования полидисперсных разнофракционных гидросмесей, которые внедрены на ВГМК, в Донецком государственном техническом 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, Смолдырёв 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.** 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. **6.** *Дементьев М.А., Печенкин М.В.* Поля концентрации взвеси и кинематика взвесенесущих потоков // Известия ВНИИГ. – Т. 84. – 1967. – С. 12 – 18. **7.** *Тюков О.В.* Турбулентная диффузия и процесс переноса взвешенных частицы условиях гидротранспорта // Труды координационного совещания по гидротехнике. – Вып. 57. – Л.: Энергия, 1971. – С. 10 – 15.

8. *Гиргидов А.Д.* Два подхода к описанию турбулентной диффузии // Гидравлика и гидромеханика». – Вып. 17. – К.: Техника, 1973. – С. 24 – 30. **9.** *Медников Е.П.* Турбулентный перенос и осаждение аэрозолей. – М.: Недра, 1981. – 175 с. **10.** *Шрайбер А.А., Милютин В.Н., Яценко В.П.* Гидромеханика двухкомпонентных потоков с твердым полидисперсным веществом. – К.: Наук.думка, 1980. – 252 с. **11.** Турбулентные течения газовзвеси / *А.А. Шрайбер, Л.Б. Гавин, В.А. Наумов, В.П. Яценко.* – К.: Наук. думка, 1987. – 240 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.** *Семененко Е.В.* Оценка взвешивающей способности и критических параметров напорных взвесенесущих потоков // Всеукраинский научно-технический журнал «Промышленная гидравлика и пневматика». – 2005. – №1(7). – С. 24 – 30. **14.** *Блюсс Б.А., Семененко Е.В., Шурыгин В.Д.* Расчет областей миграции частиц полидисперсного разноплотностного материала по сечению трубопровода при напорном гидротранспорте // Научно-технический сборник «Обогащение полезных ископаемых». – Днепропетровск, 2005. Вып. №22 (63). – С. 115 – 121. **15.** *Фоменко Т.Г.* Гравитационные процессы обогащения полезных ископаемых. – М.: Недра, 1966. – 332 с. **16.** *Хинце И.О.* Турбулентность. – М.: Физматгиз, 1963. – 680 с. **17.** *Альтшуль А.Д.* Гидравлические сопротивления. – М.: Недра, 1970. – 216 с.

Поступила в редколлегию 8.09.06.

УДК 539.3

Б.Н. ПЕНТЮК, канд. техн. наук, ВНТУ (г. Винница),
Ю.В. ЧОВНЮК, канд. техн. наук, КНУСиА (г. Киев),
О.М. ШУТОВСКИЙ, канд. физ.- мат. наук, КНУСиА (г. Киев)

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ЭВОЛЮЦИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ИМПУЛЬСОВ В ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛАХ КАК ДИСПЕРСНЫХ ФРАКТАЛЬНЫХ СРЕДАХ

Розглянута просторово-часова еволюція ультразвукових імпульсів у порошкових матеріалах як дисперсних фрактальних середовищах.

The dimensional-time evolution of the ultrasonic impulses at the powder like materials as dispersive fractal media is discussed.

Строение и свойства дисперсных сред, к которым принадлежат порошковые материалы (ПМ), привлекают в последнее время все большее внимание исследователей. Такие среды имеют чрезвычайно широкое распространение как в природе, в том числе геологического происхождения, так и в различных технологических приложениях (например, в порошковой металлургии, в