

АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ПЕСКА ПО ФРАКЦИЯМ, ИХ СРЕДНЕВЗВЕШЕННОЙ КРУПНОСТИ И СКОРОСТИ ТЕЧЕНИЯ ГИДРОСМЕСИ ПО ВЫСОТЕ СЕЧЕНИЯ ГИДРОТРАНСПОРТНОЙ ТРУБЫ

С.Н. Сальников^{1,2}, Г.З. Карандаев³

¹ Тольяттинский государственный университет, г. Тольятти

² ООО «Экотранс», г. Тольятти

³ ООО «Гидромехстройпроект», г. Тольятти

Приведен подробный анализ взаимозависимости скорости ввода гидросмеси песка в гидротранспортную трубу, определены: оптимальная величина взаимосвязи скорости ввода гидросмеси в лоток U_{cp} и критической $U_{кр}$ (параметр $k=U_{cp}/U_{кр}$); определено влияние параметра k на размер активной зоны расслоения песка по крупности в зависимости от величины плотности частиц, составляющих твердую фазу гидросмеси; выявлена линейная зависимость приращения скорости потока гидросмеси по мере приближения к ее свободной поверхности в лотке.

В совокупности эти результаты значительно облегчают конструирование сужающегося лотка в технологической схеме малоэнергоемкой технологии обогащения песка.

Ключевые слова: средневзвешенные начальные параметры гидросмеси, концентрация твердой фазы, скорость ее ввода в трубу, критическая скорость, расслоение по крупности, граничное зерно, гидравлическая крупность.

В работе [1] сделана попытка экспериментального определения взаимозависимостей гидродинамических параметров гидросмеси с механическими параметрами частиц твердой фазы при их расслоении по высоте живого сечения трубы.

В настоящей статье сделан более глубокий анализ выявленных зависимостей применительно к разработке малоэнергоемкой технологии обогащения песков в сужающихся лотках [2–9].

Для выбора оптимальных геометрических параметров сужающегося лотка необходимо знать: характер изменения концентрации твердого компонента гидросмеси (в нашем случае – песок) по высоте сечения трубы; порядок изменения скорости течения на тех же координатах; величины длины и высоты активного участка лотка, на которой параметры P_i и U_i стабилизируются имея в виду, что параметры U_{cp} и P_{cp} лотка гидросмеси, вводимой в лоток, остаются относительно постоянными.

При этом большой интерес представляет закономерность приращения скорости течения гидросмеси по мере увеличения ординаты её замера при непременном уменьшении концентрации твердого P_i .

В табл. 1 и на рис. 1–3 представлены результаты исследования зависимости $P_i=f(h_i)$ для двух разных составов песка, отличающихся средневзвешенной крупностью d_{cp} плотностью минеральных составляющих – γ_T и средневзвешенной гидравлической крупностью. При этом пески по классификации ГОСТ 8736-93 относятся к тонким.

Для определения степени влияния плотности минеральных составляющих зернистого материала

были проанализированы результаты четырех опытов (95, 99, 133 и 137) на очень тонкой концентратной смеси с $d_{cp}=0,06$ мм, $\gamma_T=3,362$ г/см³ и гидравлической крупностью 0,80 см/с.

Из анализа графиков на рис. 1 можно отметить следующее:

– чем меньше параметр $k=\frac{U_{cp}}{U_{кр}}$, тем на меньшей

высоте h_i начинается снижение концентрации твердого P_i ; в пределах $h_i = 1-8$ см снижение происходит очень резко (опыты 15 и 19), а выше – темп снижения концентрации становится очень замедленным. Закономерность такого явления очень проста – при уменьшении U_{cp} снижается и турбулентность потока гидросмеси, что приводит к большей их концентрации в придонной области трубы;

– при равных значениях концентрации твердого P_i , % в величинах $k=\frac{U_{cp}}{U_{кр}}$ графики $P_i=f(h_i)$

практически сливаются, что указывает на преобладающее значение концентрации в подобных случаях;

– при малых величинах P_i , % и больших – параметра k (более 2 – те же опыты) снижение концентрации происходит более плавно. В этом случае несомненное влияние турбулентности потока гидросмеси.

В последних двух обстоятельствах расслоение твердого компонента по крупности по высоте потока возможно только на достаточно длинном активном участке трубопровода, что вызывает определенные трудности конструирования компактной обогатительной установки на основе сужающегося лотка.

Таблица 1
Зависимость изменения показателя концентрации твёрдой фазы гидросмеси P , % по высоте сечения трубы от изменения её внешних параметров (k , $P_{ср}$, t)

№ опыта	k	$P_{ср}$, %	Объёмная концентрация P_i , % зернистого материала в координатах отбора проб по вертикальной оси трубы в см										Средняя температура гидросмеси t , °C			
			1,0	2,0	3,5	4,5	5,5	8,5	12,5	16,5	19,5	21,5		23,0	24,0	15
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
Песок № 2; $d_{ср}=0,19$ мм; $\gamma_r=2,61$ г/см ³ ; $W_{ср}=2,22$ см/с																
5	1,31	1,0	–	1,4	0,5	–	1,0	0,4	0,3	0,3	0,3	0,2	0,3	0,3	0,3	19,0–22,5
15	1,53	8,5	–	75,5	23,4	–	4,5	2,7	–	1,1	0,7	0,6	0,6	0,8	0,8	24–32,5–38
19	1,83	10,0	78,6	51,5	26,5	–	16,6	8,1	3,7	2,3	5,2	1,5	1,2	1,1	1,1	15–19,5
18	1,99	10,0	86,7	57,6	34,0	–	17,6	7,5	3,4	2,0	1,9	1,5	1,3	1,3	1,3	18,0
8	2,03	6,0	18,8	25,6	13,3	–	12,7	5,0	2,6	1,5	1,1	1,0	0,8	0,9	0,9	21,0–28,0–34,0
14	2,18	6,0	41,3	20,1	18,4	–	8,3	5,0	2,2	1,7	1,6	1,4	1,0	0,9	0,9	19,5–30,0–35,0
4	2,27	2,5	–	–	5,0	–	3,8	2,4	1,2	0,8	0,5	–	0,5	0,5	0,5	25,0
Песок № 1; $d_{ср}=0,18$ мм; $\gamma_r=2,71$ г/см ³ ; $W_{ср}=2,36$ см/с																
94	1,04	26,0	–	2,2	4,2	6,2	8,8	10,2	12,7	14,2	17,2	20,2	–	–	–	40,0
				70,6	54,4	36,2	27,7	23,9	16,0	13,9	9,4	1,9	–	–	–	–
97	1,10	22,5	–	2,8	–	4,8	6,8	8,8	10,8	13,3	14,8	17,8	20,8	22,8	22,8	32,0
				67,3	–	34,6	31,5	18,9	17,2	14,2	11,2	8,2	7,8	4,4	4,4	–
99	1,30	7,9	30,2	2,5	4,0	–	–	7,0	10,0	12,5	14,0	17,0	20,0	22,0	22,0	24,0
				23,7	14,9	–	–	9,2	5,8	5,3	4,7	4,7	3,9	2,9	2,9	–
Концентрат; $d_{ср}=0,06$ мм; $\gamma_r=3,632$ г/см ³ ; $W_{ср}=0,80$ см/с																
137	1,11	7,6	14,0	8,8	7,4	–	7,1	4,6	5,0	4,5	3,5	4,4	3,9	4,0	4,0	32,0
99	1,57	4,0	10,3	8,0	6,2	–	5,7	5,0	4,9	3,4	3,8	3,7	3,3	4,6	4,6	42,0–47,0–48,0
133	2,05	10,2	16,0	15,0	5,5	–	11,2	9,3	10,3	10,0	8,6	10,0	10,7	8,1	8,1	35,0–39,0–46,0
95	2,44	4,0	6,0	4,1	3,5	–	3,4	4,8	3,8	6,0	4,3	4,4	3,6	–	–	43,0

Примечания:

1. Порядок изложения результатов экспериментов принят по величине изменения показателя $k = \frac{U_{ср}}{U_{кр}}$ (от меньшего к большему).
2. В опытах 94, 97 и 99 координаты отбора проб гидросмеси по высоте сечения трубы были другие, поэтому в столбцах 5–15 результаты опытов представлены в дробном виде: в числителе – координата отбора проб по вертикали от низа трубы h_i в см; в знаменателе – соответствующая ей величина P_i , %.

Для выявления степени влияния величины исходной концентрации твёрдого в гидросмеси P_{cp} , % проанализированы графики функций на рис. 2 (опыты 94, 97, и 99), в результате чего установлено, что:

- максимальное снижение концентрации твёрдого достигается на высотах h_i , вдвое больших чем на графиках рис. 1. Причиной этой разницы является высокая концентрация твёрдого в исходной гидросмеси P_{cp} (в опыте 94–26,0 %; в опыте 97–22,5 %) даже при малых значениях параметра k . Доказательство этой гипотезе находим на этом же рисунке по графику опыта 99, проведенному при $k=1,30$ и $P_{cp}=7,9$ %, близким к значениям опыта 8 (см. рис. 1, $k=2,03$ и $P_{cp}=6,0$ %). Сравнение графиков опытов 8 и 99 показывает почти полную их аналогию, что, несомненно, подтверждает большого влияния величины концентрации P_{cp} , % исходной гидросмеси;

- при очень малых концентрациях P_{cp} , % расслоение по величине P_i , % практически не происходит (см. табл. 1, опыт 5), что ещё раз свидетельствует о значимости этого параметра в процессах обогащения зернистых материалов;

- небольшое различие в графиках опытов 8 (см. рис. 1) и 99 (см.рис.2) вызвано, вероятно, ощутимым различием в величинах P_{cp} (опыт 8: $P_{cp}=6,0$ %; опыт 99: $P_{cp}=7,9$ %);

- температура гидросмеси в опытах точно не фиксировалась – она менялась от 15 до 40 °С (см. табл. 1) и хотя она несомненно влияет на величину вязкости гидросмеси, практически в условиях производства ею можно пренебречь, так как её колебания при гидротранспорте не значимы.

В производственных условиях различных отраслей горнодобывающей промышленности возникает необходимость обогащения зернистых материалов различной плотности (уголь, песок, железная руда и т. п.), поэтому представляет практический интерес изучение влияния плотности минеральных составляющих зернистых материалов на процесс расслоения гидросмеси по величине концентрации твёрдой фазы при гидротранспорте по высоте (диаметру трубы) лотка.

На графиках рис. 3 представлены зависимости $P_i = f(h)$ для концентрата с плотностью минеральных составляющих $\gamma_i=3,632$ г/см³ при $d_{cp}=0,06$ мм и $W_{cp}=0,80$ см/с. В опытах 95, 99, 133 и 137 (см. табл. 1) концентрация твёрдой фазы менялась соответственно от 4,0% до 4,0% (опыт 99), 10,2 % и 7,6 %. При этом величина "k" менялась соответственно от 2,44 до 1,57; 2,05; 1,11.

Анализ этих графиков указывает на то, что:

- величина критерия k сильно влияет на характер расслоения концентрата по высоте трубы. Так, например, при $k=2,44$ практически расслоения по P_i , % нет. Причиной этого является сильная турбулизация потока гидросмеси с последующим выравниванием P_i на всех координатах h_i до $P_{cp}\approx 4,0$ % (см. табл. 1);

- сравнение графиков функций $P_i = f(h_i)$ в опытах 99 при $d_{cp}=0,18$ мм и $W_{cp}=2,36$ см/с (рис. 2) и опытом под тем же номером при $d_{cp}=0,06$ мм и $W_{cp}=0,80$ см/с (рис. 3) указывает на то, что при общей схожести характера изменения величины концентрации P_i на одинаковых координатах h_i абсолютные значения P_i в первом случае гораздо больше, чем во втором. Разница в величинах P_i

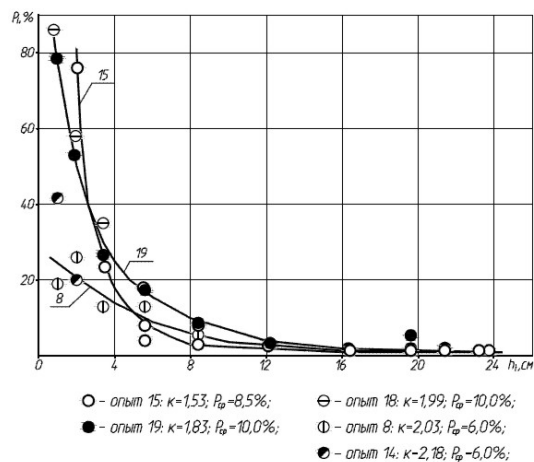


Рис. 1. Графики функций $P_i = f(h_i)$: песок № 2; $d_{cp}=0,19$ мм; $\gamma_i=2,61$ г/см³; $W_{cp}=2,22$ см/с

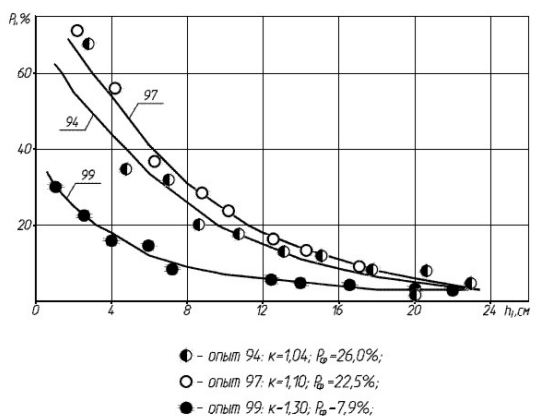


Рис. 2. Графики функций $P_i = f(h_i)$: песок № 1; $d_{cp}=0,18$ мм; $\gamma_i=2,71$ г/см³; $W_{cp}=2,36$ см/с

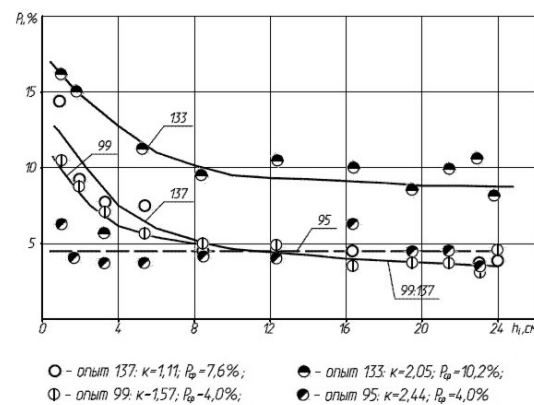


Рис. 3. Графики функций $P_i = f(h_i)$: концентрат; $d_{cp}=0,06$ мм; $\gamma_i=3,632$ г/см³; $W_{cp}=0,80$ см/с

ещё раз убедительно свидетельствует, что расслоение гидросмеси в наибольшей степени зависит от начальной концентрации твёрдой фазы гидросмеси и от степени турбулизации k : в первом случае $P_{cp}=7,9\%$; $k=1,30$, а во втором – $P_{cp}=4,0\%$; $k=1,57$.

Выше изложенный анализ изменения концентрации твёрдой фазы гидросмеси по высоте сечения трубы хорошо согласуется с выводами А.П. Юфина [5].

Для разработки технологического процесса обогащения разнородных материалов, а так же конструирования обогатительного лоткового аппарата, крайне важно знать характер изменения скоростей течения гидросмеси по координатам h при расчете геометрических параметров длины и высоты сужающегося лотка, конфигурации в плане, координат расположения конструктивных элементов, побуждающих повышение эффективности процесса обогащения, а также разгрузочных устройств для складирования обогащенного продукта (тов) и слива в отвал хвостовых фракций.

В табл. 2 приведены результаты замеров скоростей течения гидросмеси на различных координатах h_i :

– в опытах 5, 8, 14, и 19 – на песках № 2;

– в опытах 99 и 137 – на концентрате.

Графики опытов представлены на рис. 4.

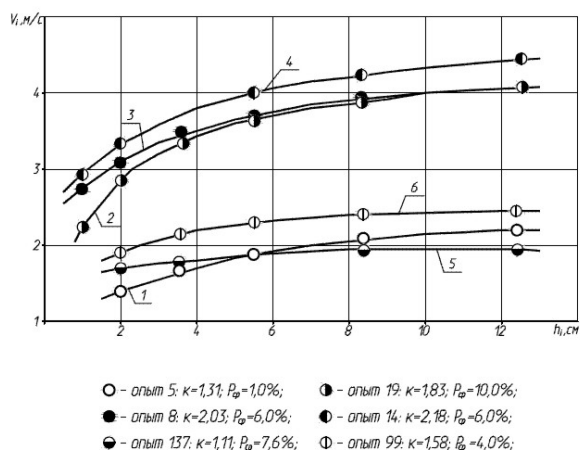


Рис. 4. Графики зависимости $V_i = f(h_i)$:
1–4 – песок № 2; 5–6 – концентрат

Анализ этих графиков свидетельствует о следующем:

– чем меньше величина параметра k , тем на низших координатах h заканчивается расслоение гидросмеси по величине P_i , причём эта закономерность соблюдается как при плотности твёрдой фазы $\gamma_T=2,61$ г/см³, так и $\gamma_T=3,63$ г/см³. Причиной этого является турбулентность потока гидросмеси, обусловленная по величине начальной средней

Таблица 2

Характер изменения скорости течения гидросмеси по высоте сечения трубы в её нижней полусфере в зависимости от внешних параметров

№ опыта	U_{cp} , м/с	$U_{кр}$, м/с	k	P_{cp} , %	t , °С	Скорости течения гидросмеси U_i , м/с по вертикальной оси сечения трубы на расстояниях h_i , см от низа					
						1	2	3,5	5,5	8,5	12,5
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Песок № 2; $d_{cp}=0,19$ мм; $\gamma_T=2,61$ г/см ³ ; $W_{cp}=2,22$ см/с											
5	1,74	1,31	1,31	1,0	$\frac{19,0}{22,5}$	–	1,38	1,70	1,86	2,04	2,20
19	3,38	1,85	1,83	10,0	15	2,20	2,90	3,40	3,57	3,84	4,01
8	3,43	1,69	2,03	6,0	$\frac{21-28}{34}$	2,65	3,07	3,39	3,63	3,97	4,03
14	3,68	1,69	2,18	6,0	$\frac{19,5-20}{38}$	2,87	3,35	3,56	3,98	4,24	4,38
Концентрат; $d_{cp}=0,06$ мм; $\gamma_T=3,63$ г/см ³ ; $W_{cp}=0,80$ см/с											
99	2,05	1,30	1,58	4,0	42	1,90	1,81	2,14	2,21	2,37	2,4
137	1,61	1,45	1,11	7,6	3,2	–	1,45	1,62	1,70	1,84	1,83

Примечания:

1. Порядок представления результатов опытов принят по увеличению параметра k как основного показателя величины турбулентности потока гидросмеси;

2. Замер скоростей U_i , м/с фиксировался до высоты $h_i=R_{тр}$ (радиус трубопровода) в предположении, что эпюра скоростей U_i выше оси трубопровода зеркальна эпюре в нижней половине трубы. Хотя фактически U_{max} всегда чуть выше оси трубы, но, полагаясь на несущественную разницу $U_{max} - U_R$, для упрощения дальнейших расчетов принимаем $U_{max}=U_R$;

3. При анализе результатов опытов следует учесть, что $\frac{\text{плотность частиц концентрата}}{\text{плотность частиц песка № 2}} = \frac{3,63}{2,61} = 1,39$, а $\frac{W_{cp} \text{ концентрата}}{W_{cp} \text{ песка}} = \frac{0,8 \text{ см/с}}{2,22 \text{ см/с}} = 0,36$ обусловлено малой величиной d_{cp} концентрата.

скоростью U_{cp} . Так, например, график 1 (опыт 5) соответствует $U_{cp}=1,74$ м/с, $k=1,31$, а график 4 (опыт 14) – $U_{cp}=3,68$ и $k=2,18$, что означает повышенную турбулентность в опыте 14 в 2,11 раза, чем в опыте 5;

– повышенная концентрация песка P_{cp} , % в опыте 14 (в шесть раз больше чем в опыте 5) также способствует выносу песка на более высокие горизонты потока гидросмеси;

– очертания графиков $U_i=f(h_i)$ 1–4 на рис. 4 в диапазоне $4 \leq h_i \leq 12,5$ см имеют полное подобие независимо от величины параметра "k". Величина начальной высоты потока $h=4$ см, с которой начинается подобие графиков, обусловлено тем, что до этой высоты, вероятно происходит вытеснение мелких частиц, как указывает А.П. Юфин [5], уменьшая концентрацию P_i в зоне $h_i=0-4$ см до такой степени, что дальнейший процесс расслоения частиц песка происходит с постоянной интенсивностью нарастания U_i . В зоне высот $h_i=0-4$ см концентрация крупных частиц песка наибольшая, поэтому при нарастании P_{cp} процесс расслоения происходит более интенсивно, т. е. влияние параметра P_{cp} в этой зоне значимо – нарастание U_i происходит более интенсивно;

– подобная аналогия графиков $U_i=f(h_i)$ наблюдается и в опытах 99 и 137 (графики на рис. 4–6), только подобие графиков начинается с $h_i \approx 7,0$ см. Причину этому нужно искать, прежде всего, в большой разнице плотности составляющих твердой фазы гидросмеси: опыты на песке – $\gamma_r=2,61$ г/см³, а на концентрате – $\gamma_r=3,63$ г/см³, т. е. во втором случае плотность выше в 1,39 раза. Кроме того, надо учесть и то, что влияние средневзвешенной крупности песчаной смеси № 2 (0,19 мм) и концентрата (0,06 мм) при разнице гидравлических крупностей ($W_{песка}=2,22$ см/с и $W_{конц}=0,8$ см/с) и большей однородности фракционного состава концентрата замедляют процесс расслоения, чему убедительно свидетельствуют наклон кривых 5 и 6 к оси абсцисс – они почти параллельны ей, в отличие от кривых 1–4;

– на основании вышеизложенного можно констатировать, что процесс активного расслоения песчаных смесей при $\gamma_r=2,6$ г/см³ происходит в придонной зоне трубопровода гидросмеси высотой, составляющей 32 % полу диаметра трубы, равно – высоте сужающегося лотка.

С увеличением же плотности до $\gamma_r=3,63$ г/см³ эта зона занимает уже 56 %.

Эти практические данные позволяют легко определить геометрические параметры лотка: высоту, ширину и длину в зависимости от плотности минеральных составляющих обогащаемого зернистого материала и критической скорости течения гидросмеси $U_{кр}$. Для уточнения расчетных операций необходимо знать также закономерность нарастания скорости течения гидросмеси U_i над активной зоной расслоения песка по крупности, что позволит с большей вероятностью рассчитать длину сужающегося лотка.

Для этих целей в табл. 3 приведены результаты замеров скоростей течения в зоне $4 \leq h_i \leq 12,5$ см в зависимости от величины параметра k , по которым на рис. 5 приведен график $U_i=f(k_i; h_i)$.

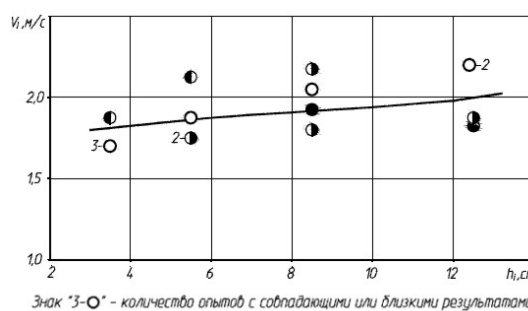


Рис. 5. График зависимости $U_i=f(k_i; h_i)$ над активной зоной расслоения ($h_i > 4$ см) частиц песка по крупности

Закономерность приращения скорости течения гидросмеси должна быть одинакова при всех значениях параметра k , чему доказательством является полное подобие графиков 1–4 на рис. 4 выше $h_i = 4$ см.

Результаты экспериментов свидетельствуют о линейной зависимости $U_i=f(k_i; h_i)$ и она может быть представлена уравнением $y = a + bx$, решаемым способом избранных точек [10] по сглаженным точкам графика на рис. 5 и равноотстоящих координат h_i в пределах $4 \leq h_i \leq 12,5$.

Параметры уравнения определены по зависимостям

$$a = \frac{\sum x^2 \sum y - \sum x \sum xy}{n \sum x^2 - (\sum x)^2}; \quad b = \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{n \sum x^2 - (\sum x)^2}.$$

Таблица 3

Характер изменения величины приращения скорости течения гидросмеси по высоте сечения трубы в её нижней полусфере в зависимости от изменения координаты h_i над активной зоной расслоения в пределах $h_i=4 - 12,5$ см

№ графика на рис. 4	К	Р, %	Прирост скорости $U_n - U_i$ в м/с при h_i , см				
			2	3,5	5,5	8,5	12,5
1	2	3	4	5	6	7	8
1 (базовый)	1,31	1,0	1,38	1,70	1,86	2,04	2,20
2	1,83	10	1,52	1,70	1,71	1,80	1,81
3	2,03	6	1,69	1,69	1,77	1,93	1,83
4	2,18	6	1,97	1,86	2,12	2,20	2,18

В табл. 4 $n = 4$ – число равноотстоящих значений $x = h_i = 2$ см; $y_i = U_i$ м/с.

Расчеты по вспомогательной табл. 4 позволили найти численные значения параметров уравнения $y = a + bx$: $a = 1,73$ и $b = 2,09$.

В окончательном виде расчетная формула выглядит так:

$$y = 1,73 + 2,09x. \quad (1)$$

В формуле параметр $x(h_i)$ приведен к размерности в метрах (см. вторую колонку в табл. 4).

Проверка точности расчетов показала:

– ошибки по всем фиксированным в опытах скоростям в сопоставлении с расчетными составляют менее 1,0 %;

– сглаженная прямая зависимости $U_i = f(h_i)$ выбрана очень удачно.

Таким образом, проведенный анализ зависимости $U_i = f(h_i)$ позволяет теоретически прогнозировать:

– распределение скоростей течения гидросмеси в сужающемся лотке по его длине от сечения ввода гидросмеси до его разгрузочной оконечности;

– активную длину лотка от начала расслоения песка по крупности до точки завершения этого процесса.

Для более точного расчета геометрических параметров необходимо знать характер расслоения песка по высоте лотка по величине средневзвешенной крупности $d_{ср.и}$.

В табл. 5 приведены наиболее представительные результаты опытов 8, 14 и 19, а также графики зернового состава песка фракций 2–0,25 мм (крупный продукт) и 0,25–0 мм (мелкий продукт) при

Таблица 4

Проверка точности результатов расчета

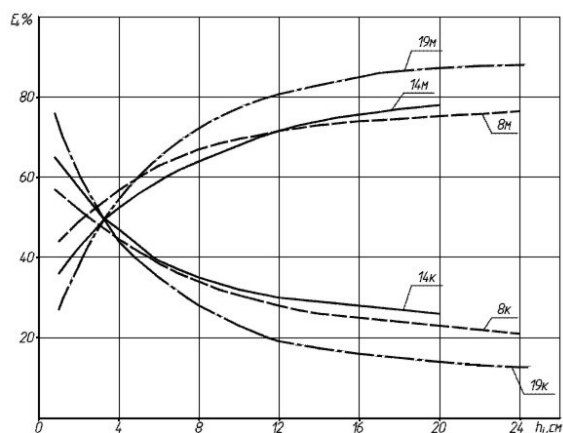
№ п/п	X_i	X_i^2	Y_i	$X_i Y_i$	Y_i -расчёт.	Ошибка, %
1	0,04	0,0016	1,82	0,0728	1,8136	-0,36
2	0,06	0,0035	1,84	0,1104	1,8554	+0,83
3	0,08	0,0064	1,90	0,152	1,8972	-0,15
4	0,10	0,0100	1,93	0,193	1,9390	+0,46
5	0,12	0,0144	1,98	0,9376	1,9808	+0,04
\sum_1^5	0,40	0,036	9,47	0,7658	–	–

Таблица 5

Фракционный состав песка в %% на каждой контрольной отметке h_i по высоте сечения трубы

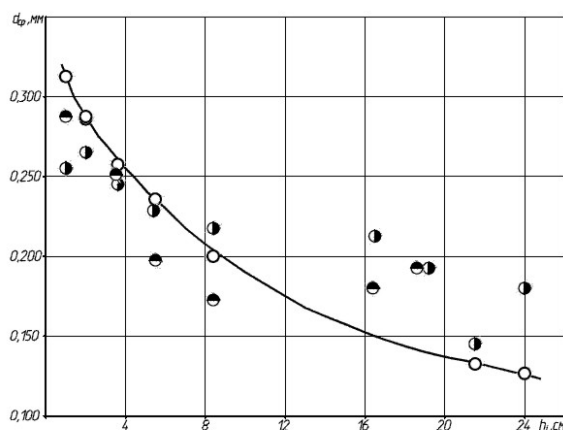
№ опыта	k	$P_{ср}, \%$	$h_i, \text{см}$	Состав фракций песка ($\varepsilon, \%$) при разделении по $d_{гп} = \pm 0,25$ мм		Средний диаметр смеси фракций $d_{ср}, \text{мм}$	Температура гидросмеси $t, \text{°C}$
				2–0,25	0,25–0		
1	2	3	4	5	6	7	8
19	1,83	10,0	24,0	12,68	87,32	0,126	15,0 19,5
			21,5	12,48	87,52	0,130	
			8,5	25,53	74,47	0,200	
			5,5	39,94	60,06	0,234	
			3,5	51,08	48,92	0,256	
			2,0	67,14	32,86	0,284	
			1,0	70,53	29,47	0,314	
8	2,03	6,0	24,0	16,48	83,52	0,180	21,0 28,0 34,0
			21,5	20,22	69,78	0,146	
			19,5	28,66	71,34	0,189	
			16,5	29,85	70,15	0,212	
			8,5	28,36	71,64	0,216	
			5,5	40,06	59,94	0,228	
			3,5	45,71	54,29	0,245	
			2,0	59,10	40,90	0,266	
14	2,18	6,0	19,5	33,25	66,75	0,189	19,5 30,0 35,0
			16,5	26,16	73,84	0,178	
			8,5	22,25	77,25	0,174	
			5,5	37,34	62,66	0,197	
			3,5	48,43	51,57	0,252	
			2,0	59,90	40,10	0,283	
			1,0	59,63	40,37	0,284	

граничном зерне разделения $d_{гр} = \pm 0,25$ мм и закономерности изменения средневзвешенного диаметра d_i , мм тех же фракций на координатах h_i (см. рис. 6 и 7).



Обозначения: 8, 14, 19 – номера опытов, Индексы "М" и "К" – мелкий и крупный продукты разделения по $d_{гр} = \pm 0,25$ мм

Рис. 6. Графики зернового состава крупного и мелкого продуктов разделения песка № 2 по $d_{гр} = \pm 0,25$ мм



○ – опыт 19 (таблица 5): $k=1,83$; $P_0=10,0\%$;
● – опыт 8: $k=2,03$; $P_0=6,0\%$;
● – опыт 14: $k=2,18$; $P_0=6,0\%$;

Рис. 7. График зависимости средневзвешенной крупности песка $d_{ср}$ по высоте диаметрального сечения трубы h_i

Анализ результатов указывает на следующее:
– содержание крупной фракции (2–0,25 мм) непрерывно снижается по мере приближения к координате $h_i = 24$ см (см. рис. 6), а мелкой – увеличивается. При этом интенсивность снижения – нарастания разная: в зоне $3 \leq h_i \leq 12$ см этот процесс ускорен, а выше – замедляется;

– значимо проявляется влияние на процесс расслоения величины параметра k – при уменьшении параметра k эффективность расслоения песка по крупности выше (см. графики крупного и мелкого продуктов опыта 19);

– расслоение песка по крупности начинается эффективно в зоне $2,5 \leq h_i \leq 3,5$ см в точке, соответ-

ствующей равной эффективности ε , %. Надо полагать, что эта точка по мере увеличения средневзвешенной крупности песка $d_{ср}$, и его концентрации в гидросмеси $P_{ср}$ будет перемещаться на более высокие горизонты h_i по критерию параметра k .

Изложенное хорошо подтверждается графиком на рис. 7, где расположением опытных точек $d_{ср,i}$ подчеркивается влияние параметра k – для эффективного расслоения песка.

Хотя в опыте 19 в зоне $9 \leq h_i \leq 21$ см отбор проб гидросмеси не производился, но расположение точек замеренных величин $d_{ср,i}$ на графике рис. 7 убедительно подчеркивает влияние параметра k на эффективность расслоения песка по крупности.

Расположение опытных точек $d_{ср,i}$, замеренных в экспериментах 8 и 14, свидетельствует о чрезмерной турбулентности потока гидросмеси и нехватка диаметра трубопровода (высоты сужающегося лотка).

Изложенный выше анализ результатов экспериментов по определению влияния на эффективность расслоения разнозернистого песка по вертикальной оси гидротранспортной трубы позволил установить, что:

– степень влияния гидродинамического параметра $k = \frac{U_{ср}}{U_{кр}}$ очень велика: чем он меньше, тем на более низких координатах h_i (высоты от днища гидротранспортной трубы – сужающегося лотка) заканчивается активное расслоение песка по крупности фракций и тем меньше вероятность выброса товарных фракций в верхнюю, «хвостовую» часть гидросмеси, так как турбулентность её также уменьшается. Результаты анализа свидетельствуют, что при $k = \frac{U_{ср}}{U_{кр}} \cong 1,30$ результаты расслоения более предпочтительны. Для практических целей необходимо учитывать то обстоятельство, что расчетную критическую скорость следует, по рекомендации [5], умножать на коэффициент надёжности $k_n = 1,1 - 1,3$.

Учитывая большую вариабельность показателей $P_{ср}$, %; $d_{ср}$, мм и их влияние на расслаиваемость песка по крупности, целесообразно в расчетах ограничить величину критерия k в пределах 1,25–1,30: меньший – при мелкозернистом песке и малой концентрации; больший – при крупнозернистом и с достаточно большой концентрацией:

– активная зона расслоения по вертикальной оси трубы (высота от днища лотка до свободной поверхности гидросмеси) зависит от плотности твердой фазы. Так, например, при $\gamma_T = 2,6$ г/см³ активная зона занимает 32 % от общей высоты h_i до оси трубы, а при $\gamma_T = 3,632$ г/см³ – 56 %, т.е. в 1,75 раза выше при приблизительном равенстве критерия $k = 1,53 - 1,57$ и $P_{ср} = 8,5 - 4,0$ %. В этих сопоставлениях высота потока гидросмеси в сужающемся лотке от днища до свободной поверхности уподобляется величине полу диаметра гидротранспортной трубы (см. рис. 1 и 3).

Активная зона расслоения растёт с увеличением концентрации твердой фазы (см. рис. 2), что, несомненно, повлияет на габариты сужающегося лотка – длины и высоты. Таким образом при конструировании обогатительного аппарата на основе сужающегося лотка необходимо предусмотреть как технические, так и технологические методы, позволяющие сохранить эффективность обогащения песка на высоком уровне;

– выявленная линейная зависимость приращения скорости потока гидросмеси по мере увеличения координаты h_i значительно облегчает расчет оптимальной длины лотка, а характер пофракционного разделения песка по высоте потока – расчет высоты лотка.

Анализ результатов экспериментальных исследований [1] значительно облегчает конструктивную разработку обогатительного аппарата на основе сужающегося лотка с самотечным транспортом гидросмеси, а также прогнозировать технологические параметры обогащения:

– граничное зерно разделения по крупности $d_{гр}$, мм;

– взаимозасорённость продуктов разделения (ϵ_k , % – засоренность крупного продукта мелким и наоборот – ϵ_m , %);

– возможность получения двух продуктов обогащения по модулям крупности M_k и M_m крупнозернистого песка для бетонных работ и мелкозернистого для штукатурных – на основе анализа фракционного состава исходного песка и величины средневзвешенной его крупности $d_{ср}$.

Литература

1. Кнороз, В.С. Перемещение песчаных материалов напорным потоком жидкости / В.С. Кнороз // Известия ВНИИГ. – Т. 40. – 1949. – С. 30–58.

2. Куприн, А.И. Классификация самотечного транспорта / А.И. Куприн // Изв. вузов. Горный журнал. – 1973. – № 6. – С. 111–119.

3. Куприн, А.И. Безнапорный гидротранспорт / А.И. Куприн. – 2-е изд. перераб. и доп. – М., Недра, 1980. – 244 с.

4. Нурок, Г.А. Процессы и технология. Гидромеханизация открытых горных работ: учебник для вузов / Г.А. Нурок. – М.: Недра, 1985. – 471 с.

5. Юфин, А.П. Гидромеханизация / А.П. Юфин. – М.: Изд-во литературы по строительству, 1965. – С. 496.

6. Минц, Д.М. О взвешивании зернистого слоя в восходящем потоке жидкости / Д.М. Минц // ДАН СССР. – Т. 82, № 1. – 1952.

7. Минц, Д.М. О гидродинамическом сопротивлении взвешенного в потоке зернистого слоя / Д.М. Минц // ДАН СССР. – Т. 83, № 4. – 1952.

8. Альтикуль, А.Д. Гидравлика и аэродинамика (Основы механики жидкости): учебное пособие для вузов / А.Д. Альтикуль, П.Г. Киселев. – М.: Стройиздат, 1975. – 333 с.

9. Меламут, Д.Л. Гидромеханизация в мелиоративном и водохозяйственном строительстве / Д.Л. Меламут. – М.: Стройиздат, 1981.

10. Веденатин, Г.В. Общая методика экспериментального исследования и обработки опытных данных / Г.В. Веденатин. – М.: Колос, 1973. – 199 с.

Сальников Сергей Николаевич, инженер, аспирант, Архитектурно-строительный институт, Тольяттинский государственный университет, заместитель директора ООО «Экотранс» (Тольятти), sergeisalnikov@mail.ru

Карандаев Геннадий Захарович, кандидат технических наук, Лауреат премии Совета Министров СССР, научный консультант ООО «Гидромехстройпроект» (Тольятти)

Поступила в редакцию 22 сентября 2015 г.

ANALYSIS OF DISTRIBUTION OF SAND CONCENTRATION BY SIZES, THEIR AVERAGE WEIGHTED FINENESS AND THE SLURRY FLOW RATE ALONG THE CROSS-SECTIONAL HEIGHT OF A SLURRY PIPELINE

S.N. Salnikov^{1,2}, sergeisalnikov@mail.ru

G.Z. Karandaev³

¹ Togliatti State University, Togliatti, Russian Federation

² EcoTrans, LLC, Togliatti, Russian Federation

³ Hydromechstroyproject, LLC, Togliatti, Russian Federation

The complex analysis on interdependence of a speed of introduction of sand slurry into a slurry pipeline is conducted. The authors have specified: optimal value of interrelation of the speed of slurry introduction into a channel U_{avg} and the critical U_{cr} (parameter $k = U_{avg}/U_{cr}$); effect of k parameter on the size of the active zone of sand lamination by fineness depending on the particles density value, which comprise the solid phase of slurry; linear dependence of the slurry flow increment velocity as far as it approaches its free surface in the channel.

As a whole, these results significantly facilitate the design of tapering channels in the flow-chart of the energy intensive technology of sand beneficiation.

Keywords: average weighted initial parameters of slurry, solid concentration, speed of its introduction into a pipe, critical speed, lamination by fineness, near-mesh grain, fall diameter.

References

1. Knoroz V.S. [The movement of sand materials so that the pressure fluid flow]. *Izvestiya VNIIG*, 1949, vol. 40, pp. 30–58. (in Russ.).
2. Kuprin A.I. [Classification of gravity transport]. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal* [News of the Higher Institutions. Mining Journal], 1973, no. 6, pp. 111–119. (in Russ.).
3. Kuprin A.I. *Beznapornyj gidrotransport* [Unconfined hydrotransport]. Moscow, Nedra Publ., 1980. 244 p.
4. Nurok G.A. *Processy i tehnologija. Gidromehanizacija otkrytyh gornyh rabot* [Processes and technology. The dredging surface mining]. Moscow, Nedra Publ., 1985, 471 p.
5. Jufin A.P. *Gidromehanizacija* [The dredging]. Moscow, Izdatel'stvo literatury po stroitel'stvu Publ., 1965. 496 p.
6. Minc D.M. *O vzheshivanii zernistogo sloja v voshodjashhem potoke zhidkosti* [Weighing the granular layer in the upward flow of fluid]. *Doklady Akademii nauk SSSR* [Reports of Academy of Sciences of the USSR], 1952, vol. 82, no. 1.
7. Minc D.M. *O gidrodinamicheskom soprotivlenii vzheshennogo v potoke zernistogo sloja* [Of the weighted hydrodynamic resistance in the flow of the granular layer]. *Doklady Akademii nauk SSSR* [Reports of Academy of Sciences of the USSR], 1952, vol. 83, no. 4.
8. Al'tshul' A.D., Kiselev P.G. *Gidravlika i aerodinamika (Osnovy mehaniki zhidkosti)* [Hydraulics and aerodynamics (fluid mechanics Basics)]. Moscow, Strojizdat Publ., 1975, 333 p.
9. Melamut D.L. *Gidromehanizacija v meliorativnom i vodohozhajstvennom stroitel'stve* [The dredging in the water reclamation and construction]. Moscow, Strojizdat Publ., 1981.
10. Vedenapin G.V. *Obshhaja metodika jeksperimental'nogo issledovanija i obrabotki opytnyh dannyh* [General methodology of experimental research and processing of experimental data]. Moscow, Kolos Publ., 1973, 199 p.

Received 22 September 2015

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Сальников, С.Н. Анализ распределения концентрации песка по фракциям, их средневзвешенной крупности и скорости течения гидросмеси по высоте сечения гидротранспортной трубы / С.Н. Сальников, Г.З. Карандаев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2016. – Т. 16, № 1. – С. 26–34. DOI: 10.14529/build160104

FOR CITATION

Salnikov S.N., Karandaev G.Z. Analysis of Distribution of Sand Concentration by Sizes, Their Average Weighted Fineness and the Slurry Flow Rate Along the Cross-Sectional Height of a Slurry Pipeline. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*. 2016, vol. 16, no. 1, pp. 26–34. (in Russ.). DOI: 10.14529/build160104