

Павел ВЛАСАК, Мирослав СЕВЕРА

Институт гидродинамики Чехословацкой академии наук

ГИДРАВЛИЧЕСКАЯ ЗАКЛАДКА ЗОЛЬНОЙ ГИДРОСМЕСЬЮ В ШАХТЕ "ХАНДЛОВА"

Анотация: Представлены экспериментальные результаты по гидротранспортировке зольных гидросмесей в диапазоне объемных концентраций с 12 % до 35 %. На основе экспериментальных данных установлены материальные константы и интегральные параметры потока зольных пульп использованных для закладки выработанных шахтерных пространств. Эксперименты были выполнены на пробной установке и на полузаводском и производственном трубопроводах в шахте Хандлова. Для ориентации были рассмотрены и другие закладочные материалы как на пример мелкозернистый песок и смесь золы и песка с илом.

1. Введение

На угольной шахте "Хандлова" используется для закладки выработанных пространств наплыв водой. На шахте невозможно использовать самотек зольной гидросмеси из поверхности шахты, так как основная линия шахты и тоже транспортная дорога идет горизонтальной штольной. Так как на шахте отказывается от рельсового транспорта в штольных второго порядка, где заменяется транспортом конвейерным и подвесным, необходимо решать гидротранспорт золы на больше расстояние. Проект предполагает постройку центральной насосной станции, в которую бы зола транспортировалась рельсовым транспортом. Сгущенная зольная гидросмесь, подготовленная прямо в насосной станции, будет в первом варианте транспортироваться почти горизонтальным трубопроводом на расстояние 1,5 - 2,0 км. В другом варианте наплыв зола осуществиться сначала вертикальным трубопроводом в высший этаж шахты (превышение приблизительно 120 м) и потом снова горизонтальным трубопроводом на то самое расстояние.

Исследования выполнены на пробной установке и также на полузаводском и производственном трубопроводах на угольной шахте с целью установить параметры потока сгущенной гидросмеси и проверить подходящий диаметр трубопровода в связи с насосной техникой. В течении экспериментальных исследований были определены следующие интегральные характеристики потока гидросмеси: средняя скорость, гидравлический уклон потока гидросмеси, объемная (отношение суммы объемов твердых частиц, заключенных в данный момент времени в объеме трубы к величине этого объема) и объемная расходная концентрация (отношение суммы объемов всех движущихся твердых частиц, прошедших через поперечное сечение трубы к всему объему пульпы, прошедшему тоже се-

чение за то же время). Были исследованы два сорта вола, мелкозернистый кварцевый песок и их смеси с илом. Проверились трубопроводы из фланцевых стальных труб внутреннего диаметра 0,042, 0,050 и 0,065 м.

2. Исследованные материалы

Зола содержит 60 - 75 % зерн крупности с 63 до 250 $\mu\text{м}$, форма зерн очень разнообразная и острокантная, поверхность зерн шероховатая, зерна в потоке пульпы сравнительно быстро деградируют. Микроскопическое рассмотрение показывает, что зерна различного повода. Из этого следует, что надо предполагать и неодинаковую удельную плотность отдельных частиц транспортированного материала.

Были исследованы два сорта вола, из которых сорта 2 оказывала лучшие свойства для гидротранспорта. Пористость насыпной вола почти 65 %, средняя влажность приблизительно 13 %. Удельная плотность высушенной вола $\rho_m = 1860 - 1890 \text{ кг/м}^3$. Природный материал, храненный в условиях шахты достигает за счет высшей влажности удельной плотности $\rho_m = 1450 - 1620 \text{ кг/м}^3$.

Кварцевый песок тоже почти однородный, приблизительно 85 % частиц крупности 0,1 - 0,5 мм. Как зола так и песок не совсем пригодными для гидротранспорта. Исследованный ил сравнительно крупнозернистый. Он содержит мало мелких частиц, более чем 70 % частиц крупности больше чем 0,1 мм. Поэтому может ил улучшить гидротранспортные свойства только песчаных гидросмесей. Гранулометрические составы, удельные плотности и вычисленные среднее геометрические крупности вола, песка, ила и их смесей даны в таблице 1, гранулометрические кривые показаны на рисунке 1.

Данные исследованных материалов

Таблица 1

Крупность зерн d_i [мм]	Процентное содержание фракций x_i [%]					
	зола 1	зола 2	песок	ил	зола 2 + ил (6:1)	песок + ил (4:1)
0 - 5	1,02	1,30	-	5,5	1,90	1,10
5 - 25	5,89	7,50	-	15,1	8,59	3,02
25 - 45	15,28	10,65	-	2,1	9,43	0,42
45 - 63	20,53	3,85	-	0,4	3,36	0,08
63 - 100	22,44	44,30	0,4	0,5	38,04	0,42
100 - 250	40,08	30,60	25,6	14,2	28,26	23,32
250 - 500	1,62	1,20	58,3	12,2	2,77	49,08
500 - 1000	0,05	0,60	15,1	24,4	4,00	16,96
1000 - 4000	-	-	0,6	25,6	3,65	5,60
удельная плотность ρ_m [кг/м ³]	1890	1860	2590	2540	1970	2580
средняя крупность d_{50} [мм] зерна	0,101	0,106	0,389	0,752	0,198	0,462

3. Трубопроводы

Зольная гидросмесь в шахте была черпана поршневым насосом фи. Путамейстер, типа Пионер КК 139 Г (параметры показаны в таблице 2). Трубо-

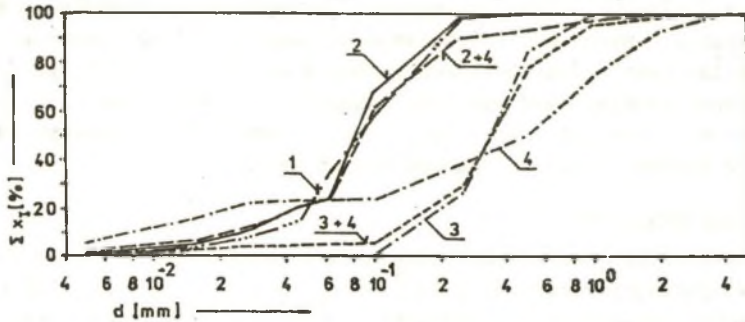


Рис. 1. Кривые гранулометрического состава исследованных материалов (1 - вода 1, 2 - зола 2, 3 - песок, 4 - ил)

провод составлен из фланцевых стальных труб внутреннего диаметра 0,050 м. Одинаковые трубы употреблены тоже для опытной установки, где были проверены тоже трубы внутреннего диаметра 0,042 м. На полувыводском трубопроводе были исследованы трубы внутреннего диаметра 0,050 и 0,065 м. Схема опытной установки показывает рис. 2.

Параметры поршневых насосов ф. Путземстер

Таблица 2

насос	объемный расход Q		напор H	мощность V	масса G
	(м ³ /ч)	(л/с)	(МПа)	(кВт)	(кг)
Пионер КК 139 Г (Pionier КК 139 Н)	10	2,78	4,0	15	780
Элефантино МВС 1002 (Elefantino MBS 1002)	15	4,17	8,3	40-42	2200

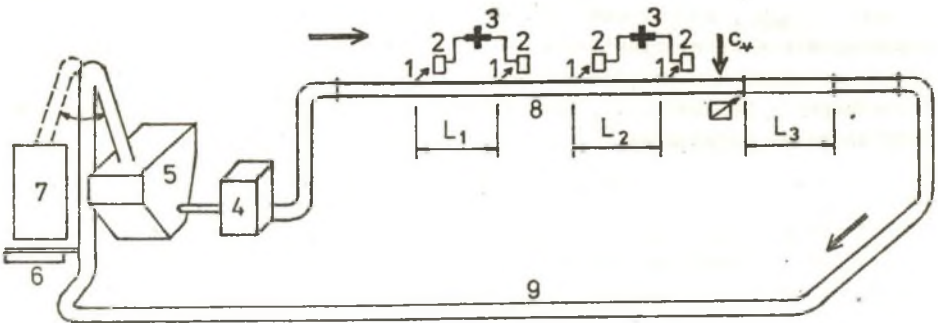


Рис. 2. Схема опытной установки (1 - одбор давления, 2 - отстойник, 3 - датчик давления, 4 - насос Пионер КК 139 Г, 5 - резервуар, 6 - весы, 7 - пикнометр, 8 - стальная труба, $D_i = 0,050$ м или 0,042 м, 9 - возвратный участок, L_1 и L_2 - измерительные участки, L_3 - стеклянный участок, C_x - датчик концентрации)

Расход трубопровода был регулирован от 0,5 л/с до 3,5 л/с изменением оборотов двигателя насоса. Понижением частотности насоса возникает при расходах $Q_{sm} \leq 1,5$ л/с выразительный пульвационный поток, который несоответствует движению пульпы в производственном трубопроводе.

На трубопроводах были два измерительные участка перепада давления, который был измерен с помощью индуктивных дифференциальных датчиков Фи. Готтингер-Валдвин Месстехник. Концентрация гидросмеси была измерена с помощью абсорбции гама лучей. Объемный расход и на опытной установке тоже расходная концентрация были измерены пикнометрическим методом. В трубопроводах был тоже стекляной участок для непосредственного наблюдения характера потока и возникновения и движения донных слоев.

4. Анализ проблематики

Гидросмеси типа вода-зола и вода-песок принадлежат к категории мелкозернистых дисперсных смесей ($5 \cdot 10^{-5} < d_{50} < 5 \cdot 10^{-4}$ м, $\rho_m > 1,5 \rho_v$). Гидравлический уклон потока гидросмеси в трубе определяется по основном соотношении

$$i_{sm} = i_v + \Delta i, \quad (1)$$

которому отвечает и уравнение Дуранда

$$i_{sm} = i_v (1 + c_v \cdot \varphi), \quad (2)$$

где i_{sm} и i_v - гидравлический уклон потока гидросмеси и несущей жидкости, Δi - прирост уклона вызванный наличием твердых частиц в пульпе, c_v - объемная концентрация, φ - функция Дуранда, ρ_m и ρ_v - плотность твердого и несущей жидкости.

Один из основных параметров потока гидросмеси является критическая скорость. Значение критической скорости возможно оценить согласно ряду авторов, но всегда надо иметь в виду, которое значение скорости автор описывает. Это может быть скорость U_{kr} , при которой гидравлический уклон достигает своего минимального значения, значит

$$\frac{d i_{sm}}{d U_{sm}} = 0. \quad (3)$$

Дальше $U_{kr, min}$, критическая скорость, при которой на дне трубы начинает образовываться неподвижный слой выпавших из потока частиц, и $U_{kr, max}$, значение скорости, при которой доновый слой размывается. Например согласно Хаскейверку и Карлину [3], которые занимались течением пульпы с наносами, действительно соотношение

$$U_{kr, max} = 1,32 U_{kr, min}. \quad (4)$$

С точки зрения защиты трубопровода от блокировки естественно угодно использовать больших значений скоростей, но с энергетической точки зрения экономически выгодная производственная скорость гидросмеси

$$U_{sm} = k \cdot U_{kr} \quad (5)$$

где множитель $k = 1,1 - 1,2$.

Следующей важной характеристикой суспензии является гидравлическая крупность w , которая играет ведущую роль прежде всего в вертикальных и наклонных трубопроводах. Было произведено вычисление гидравлической крупности по уравнениях предположенных семи авторами (Будрик, Соколов, Оверов, Рихардс, Гончарев, Стокес и Зредов). Гидравлическая крупность

распределена в диапазоне от $2,81 \cdot 10^{-3}$ до $4,25 \cdot 10^{-3}$ м/с - среднее значение $\bar{w} = 3,62 \cdot 10^{-3}$ м/с.

Для сгущенной суспензии выгодно использовать скорости осаждения облака частиц w_c чем гидравлической крупностей отношению к среднему верну. Скорость осаждения облака w_c возможно вычислить например из уравнения Томаса [3] для $c_v < 0,43$ как

$$w_c = w \cdot e^{-5,9 c_v} \quad (6)$$

или из уравнения

$$w_c = a \cdot w (1 - c_v)^3 / c_v, \quad (7)$$

где $a = 0,123$ для $0,3 < c_v < 0,7$ по Стейну и $a = 0,149$ для $c_v < 0,4$ по Рихардсону и Меиклу. Из аналогичных значений скорости осаждения w_c и средней скорости потока суспензии U_{sm} возможно вычислить объемную расходную концентрацию в восходящем вертикальном потоке.

$$c_{t,\uparrow} = 0,5 (U_{sm}/w_c + 1) - [0,25 (U_{sm}/w_c + 1)^2 - c_v \cdot U_{sm}/w_c]^{1/2}, \quad (8)$$

где выразительно проявляется относительная скорость частиц и жидкости. В нашем случае действительно неравенство $U_{sm}/w_c > 350$ и из уравнения (8) следует, что возможно использовать приближительным отношением

$$c_{t,\uparrow} \doteq c_v \quad (9)$$

как показывает таблица 3. Потом гидравлический уклон в трубопроводе с уклоном σ от горизонтальной можем написать как

$$i_{sm,\sigma} = i_v \cdot [1 + \varphi (c_v \cdot \cos \sigma + c_{t,\uparrow} \cdot \sin \sigma)] \quad (10)$$

или с использованием уравнения (9)

$$i_{sm,\sigma} \doteq i_v \cdot [1 + \varphi \cdot c_v (\sin \sigma + \cos \sigma)]. \quad (11)$$

Для горизонтального и вертикального потоков имеет место тоже самое уравнение

$$i_{sm} = i_v (1 + \varphi c_v). \quad (2)$$

Значение объемной расходной концентрации в восходящей вертикальной трубе Таблица 3

U_{sm}/\bar{w}		10	50	100	200	350	500
c_v	0,10	0,0917	0,0982	0,0991	0,0996	0,0998	0,0998
	0,20	0,1849	0,1968	0,1984	0,1992	0,1996	0,1997
	0,30	0,2798	0,2958	0,2979	0,2990	0,2994	0,2996

Поэтому суммарные потери напора в трубопроводе, в котором только горизонтальные и вертикальные участки, можно вычислить по уравнению

$$H = i_{sm} \cdot L_p + (h_2 - h_1) \cdot \rho_{sm} \cdot g + \sum h_z, \quad (12)$$

где плотность гидросмеси

$$\rho_{sm} = c_v \cdot \rho_m + (1 - c_v) \cdot \rho_v \quad (13)$$

и L_p - расчетная длина транспортирования, $(h_2 - h_1)$ - геодезическая высота подачи пульпы, Σh_2 - сумма местных потерь напора в трубопроводе.

5. Экспериментальные результаты

В виду характера суспензии был для обработки экспериментальных данных избран модифицированный метод Дуранда [2, 4], который позволяет на сравнительно малого числа опытных данных определить материальные константы и гидротранспортные параметры суспензии.

Измерения выполнялись на вольных суспензиях с объемной концентрацией от 12,8 до 33,6 %, на песчаных суспензиях с концентрацией от 25 до 30%, на гидросмеси вода - зола + ил (отношение 6:1) для концентрации 40 % и вода - песок + ил для концентрации от 34 до 37 %. Для всех этих гидросмесей были определены материальные константы B и α , которые позволяют вычислить значение функции Дуранда

$$\varphi = B \cdot Fr^{-\alpha}, \quad (14)$$

где число Фруда для гидросмеси

$$Fr = U_{sm}^2 / g \cdot D_1. \quad (15)$$

Значения констант для отдельных гидросмесей показаны в таблице 4.

Полученные опытные данные и зависимости функции Дуранда от числа Фруда показывает рисунок 3.

Материальные константы для закладочных гидросмесей Таблица 4

материал	зола 1	зола 2	песок	зола 2 + ил (6 : 1)	песок + ил (4 : 1)
B	13,84	22,84	30,36	18,41	5,78
α	1,885	1,200	1,352	1,020	1,254

С помощью констант B и α была определена функция Дуранда и для равных диаметров трубопровода от 0,050 до 0,100 м были исчислены и нарисованы $i-U$ диаграммы (смотри рис. 4), которые иллюстрируют соотношение между гидравлическим уклоном, скоростей и концентрацией гидросмеси.

6. Заключение

Проект гидротранспорта зола для закладки на шахте Хандлова предполагает постройку центральной насосной станции и трубопровода по одной из двух альтернатив. Первая предполагает почти горизонтальный трубопровод, вторая качание пульпы сначала вертикальной трубой в высший этаж (превышение 120 м) и потом почти горизонтальным трубопроводом. Если местные потери напора приблизительно 20 % общих, возможно для максимальной транспортной дистанции написать

$$L_{p,max} = [0,8 H_{max} - (h_2 - h_1) \cdot \rho_{sm} \cdot g] / i_{sm}, \quad (16)$$

где H_{max} - максимальный напор насоса. Оптимальный эксплуатационный режим возможно определить на $i-U$ диаграмм в зависимости от типа и концентрации гидросмеси. Для очень густенных вольных гидросмесей ($C_s = 25 - 30 \%$,

значит сгущение 625 - 800 кг золь на 1 м³ воды) в трубопроводе $D_I = 0,050$ м удобная эксплуатационная скорость $U_{sm} > 1,25$ м/с ($Q_{sm} > 8,84$ м³/ч), которой соответствует потери напора $i_{sm} = 1,2 - 1,4$ МПа/км.

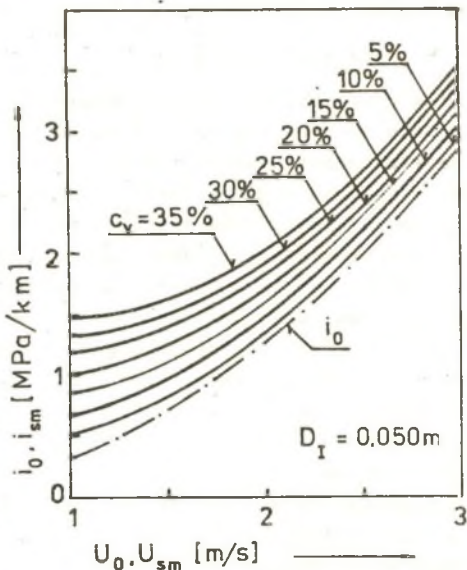
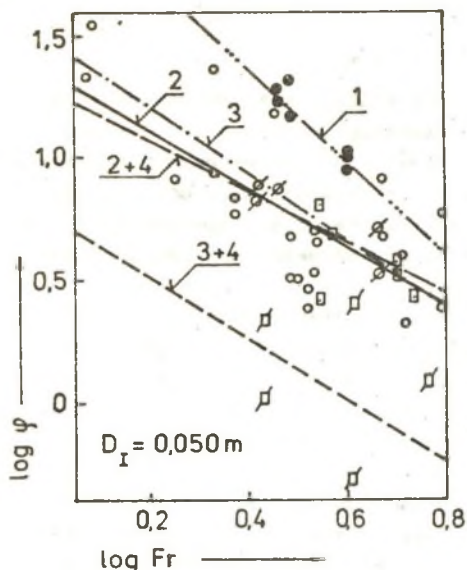


Рис. 3. Опытные зависимости и данные (1 - вода, 2 - зола, 3 - песок, 4 - гл.)

Рис. 4. Зависимость гидравлического уклона от скорости и концентрации гидросмеси (зола, диаметр трубы 0,050 м)

Максимальная длина транспортирования $L_{p,max}$ [м] в трубопроводе диаметром $D_I = 0,050$ м Таблица 5.

концентрация	C_v [%]		20				30			
	ρ_{sm} [кг/м ³]		1178				1267			
геодев. высота подачи пульпы	$(h_2 - h_1)$ [м]		0		120		0		120	
	Q_{sm} [м ³ /ч]	U_{sm} [м/с]	i_{sm} [Па/м]	Q_m [кг]	$L_{p,max}$ [м]	i_{sm} [Па/м]	Q_m [кг]	$L_{p,max}$ [м]	i_{sm} [Па/м]	Q_m [кг]
Пионер	8,84	1,25	1060	3315	3019	1711	1340	4973	2388	1275
	9,90	1,40	1140	3713	2807	1591	1400	5569	2286	1210
Элефантино	11,31	1,60	1280	4241	5188	4104	1520	6362	4368	3387
	12,72	1,80	1450	4770	4579	3623	1680	7155	3952	3065

Максимальные транспортные дистанции для обеих альтернатив показывает таблица 5.

Литература

- [1] Hrbek, J., Severa, M., Vlasák, P.: Zpráva ÚH ČSAV č. 582/S/81, Praha 1981
- [2] Hrbek, J., Vlasák, P.: Zpráva ÚH ČSAV č. 146/Z/66, Praha 1966
- [3] Kupka, F., Hrbek, J., Janalík, J.: Hydraulická doprava v potrubí, SNTL, Praha 1970
- [4] Vlasák, P., Severa, M.: Zpráva ÚH ČSAV č. 582/S/81, Praha 1981

Рецензент: Prof. dr hab. inż. Jan PALARSKI

PODSADZKA HYDRAULICZNA MIESZANINĄ POPIOŁOWO-WODNĄ
W KOPALNI HANDLOVA

S t r e s z c z e n i e

Artykuł opisuje doświadczalną pracę na gęstej fazie doprowadzającej zawiesiny ciał stałych z wodą do hydraulicznego podsadzania. Transportowe właściwości zawiesin z popiołem, drobnym piaskiem kwarcowym i mieszaniny popiołu z gliną (stosunek wagowy 6:1) lub mieszaniny piasku z gliną (proporcja 4:1) były mierzone na testowej instalacji i sprawdzone do pilotowej instalacji przemysłowej i instalacji przemysłowej bezpośrednio w kopalni Handlova (Centralna Słowacja).

Badane zawiesiny były pompowane pompą tłokową Pionier KK139H (Putzmeister, Austria) przez stalową kryzę wmontowaną w rurociąg. Badania przeprowadzono dla średnicy wewnętrznej rurociągu D_I - 0,05 m jak też rurociągu o średnicy 0,042 i 0,06. Zakres średnich prędkości zawiesiny U_{sr} zmienia się od 0,75 do 1,83 m/s przy objętościowej koncentracji zmieniającej się od 12 do 40%.

Następujące wielkości ww. zawiesin były mierzone: zakres przepływu i średnia prędkość, gradient ciśnienia (spadek ciśnienia) wolumetrów (rozkład koncentracji) i koncentracja na testowej instalacji. Ponieważ odcinek badawczy wbudowany w instalację testową i w instalację przemysłową, pilotujące warunki przepływu i krytyczna prędkość osadzania mogą być dalej przewidywane. Zmodyfikowana metoda Duranda była wykorzystana do oceny danych badawczych i obliczania stałych materiałowych (współczynnik i wykładnik przybliżenia funkcji Duranda = BFr) i parametrów przepływu badanych zawiesin w rurociągu o wewnętrznej średnicy w zakresie od 0,05 do 0,10 m. Optymalny operacyjny wzór dla rurociągu o wewnętrznej średnicy 0,05 m i mieszaniny popiołu został określony. Koncentracja objętościowa c_v od 25 do 30% (tzn. 625-800 kg popiołu i 1 m³ wody) średnia prędkość od 1,25 do 1,40 m/s (tzn. natężenie przepływu 8,84 do 0,90 m³/h) i odpowiedni gradient ciśnienia $i_{sm} = 1,2 - 1,4$ MPa/km.

Jeżeli pompa tłokowa Pionier KK139H jest używana, możliwe jest splukanie zawiesiny popiołu z wodą z wody o 30% objętościowej koncentracji na odległość 2,3 km w przypadku dominującego poziomu przesyłu. Dla przypadku pompowania wyższej odstawy poziomu kopalni (różnica poziomów wynosi około 120 m) można osiągnąć odległość transportową ponad 1,2 km. Oczywiście odległość transportowa może być przedłużana jeśli koncentracja ciał stałych jest obniżana dla objętościowej 20% koncentracji (tzn. 470 kg popiołu na 1 m³ wody) odległość transportowa zwiększa się do 3 km dla poziomego przepływu lub na 1,7 km jeżeli różnica poziomów instalacji wynosi 120 m.

HYDRAULIC BACKFILLING BY WATER-ASH MIXTURES
IN THE HANDLOVA COAL MINE

S u m m a r y

The paper describes experimental work on the dense phase conveying of water-solid slurries used for hydraulic backfilling. Transport characteristics of the slurries with ash, fine quartz sand and the ash-clay mixtures (weight ratio 6:1) or the sand-clay one (weight ratio 4:1) were measured on test loop and verified on pilot plant loop and line under operation directly in colliery Handlová.

The slurries were pumped by piston pump Pionier KK 139 H through steel flange-mounted pipeline of inner diameter 0,050, 0,042 and 0,065 m. Range of mean velocities of slurries varied from 0,75 to 1,83 m/s, volumetric concentration varied from 12 % to 40 %.

The following quantities were measured: rate of flow and mean velocity, pressure gradient and volumetric spatial and transport concentration. Also because transparent section, the flow regime and critical deposit velocity could be followed up.

A modified Durand's method was used to evaluate experimental data and to calculate material's constants and flow parameters of the investigated slurries in the pipes of inner diameter varying from 0,050 to 0,100 m. The optimum operational mode for pipeline of inner diameter 0,050 m and ash-water slurry was determined: volumetric concentration from 25 to 30 %, mean velocity from 1,25 to 1,40 m/s and correspondent pressure gradient 1,2 - 1,4 MPa/km. If the pump Pionier is used, it is possible to convey ash-water slurry of volumetric concentration 30 % over distance 2,3 km in case of predominantly horizontal conveying.