

УДК 532.542 + 532.574

Ю.В. Коровина

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДВИЖЕНИЯ ЧАСТИЦ ТВЕРДОГО В ТРУБОПРОВОДАХ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УГЛАХ НАКЛОНА

Гидротехнология на современном этапе ее развития, в виде подземных локальных гидроучастков, строящихся в сложных горно-геологических условиях на шахтах с обычной технологией, обладает целым рядом позитивных качеств, таких как низкая себестоимость добычи угля и высокая производительность. При этом возникает ряд вопросов, связанных с выбором технологических схем выдачи угля на поверхность и его обезвоживания.

Обезвоживание угля и осветление воды в подземных условиях, особенно мелких фракций, невозможно без строительства специальных комплексов, что требует больших капитальных и временных затрат. Не окончательно решен и вопрос достаточного осветления воды. Поэтому переход шахт с обычной технологией добычи угля на гидравлическую реализуется с выдачей угля напорным гидротранспортом и последующим его обезвоживанием на поверхности. В связи с этим важное теоретическое значение приобретает исследование процесса движения частиц твердого в напорных трубопроводах при различных условиях его применения.

Известные методы расчета параметров напорного гидротранспорта разработаны для ограниченной области приме-

нения по одному или нескольким параметрам: крупности транспортируемого материала  $d$ ; плотности твердого  $\rho$ ; углу наклона трубопровода  $\gamma$  (табл 1).

Данные по методам расчета параметров напорного гидротранспорта, приведенные в таблице 1, позволяют сделать вывод об отсутствии общего теоретического подхода и единой физической модели движения частиц твердого в трубопроводах, что подтверждается их апробацией при эксплуатации напорных пульповодов. Например, значительная часть отказов напорного гидротранспорта шахты «Юбилейная» по причине забучивания става трубопроводов, связана с отклонениями расчетных значений с практическими результатами. Следовательно, возникает задача разработки единой методики расчета параметров напорного гидротранспорта, наиболее полно отражающей физические процессы, протекающие в напорных трубопроводах при перемещении частиц твердого материала, что требует учета всех сил взаимодействия между элементами системы «поток-частица-трубопровод».

Модель движения частицы в потоке жидкости, ограниченного стенками трубопровода, характеризуется следующими физическими условиями движения

частиц.

1. Эпзорой распределения скорости жидкости по поперечному сечению трубопровода, что приводит:

1.1 - к различию скорости движения жидкости относительно верхней и нижней поверхности частицы;

1.2 - равенству скорости движения жидкости относительно ее боковых поверхностей.

2. Трением частицы о стенку трубопровода.

Указанные условия движения частиц позволяют сформулировать общие условия моделирования процесса движения частицы твердого в напорном трубопроводе:

- гидродинамические силы, действующие на верхнюю и нижнюю поверхности частицы твердого не уравновешены, что следует из условий движения 1.1 и 2;

- гидродинамические силы, действующие на боковые поверхности частицы твердого, усредняются и уравновешиваются в процессе движения при смене ее положений относительно потока, что следует из условий движения 1.2.

Принятые условия моделирования позволяют рассматривать модель частицы в форме цилиндра, основание которого расположено параллельно продольному сечению трубопрово-

Таблица 1. Область применения известных методов расчета напорного гидротранспорта

Автор	Диапазон изменения исходных параметров			
	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Крупность $d$ , мм	Угол наклона $\gamma$ , градус	Транспортируемый материал
А.П. Юфин [1]	1300 - 1500	0 - 6	0°	Рядовой уголь
В.С. Мучник [2]	1300 - 1500	0 - 100	90°	Рядовой уголь
В.С. Кнороз [3]	2650 - 3000	0 - 0,7	0°	Отходы углеобогащения
ВНИИГ [4]	2650 - 3000	0 - 3	0°	Песка и гравия
В.В. Трайнис [5]	1300 - 1500	0 - 100	0°	Рядовой уголь
А.Е. Смолдырев [6]	1300 - 1500	0 - 100	0°, 90°	Рядовой уголь

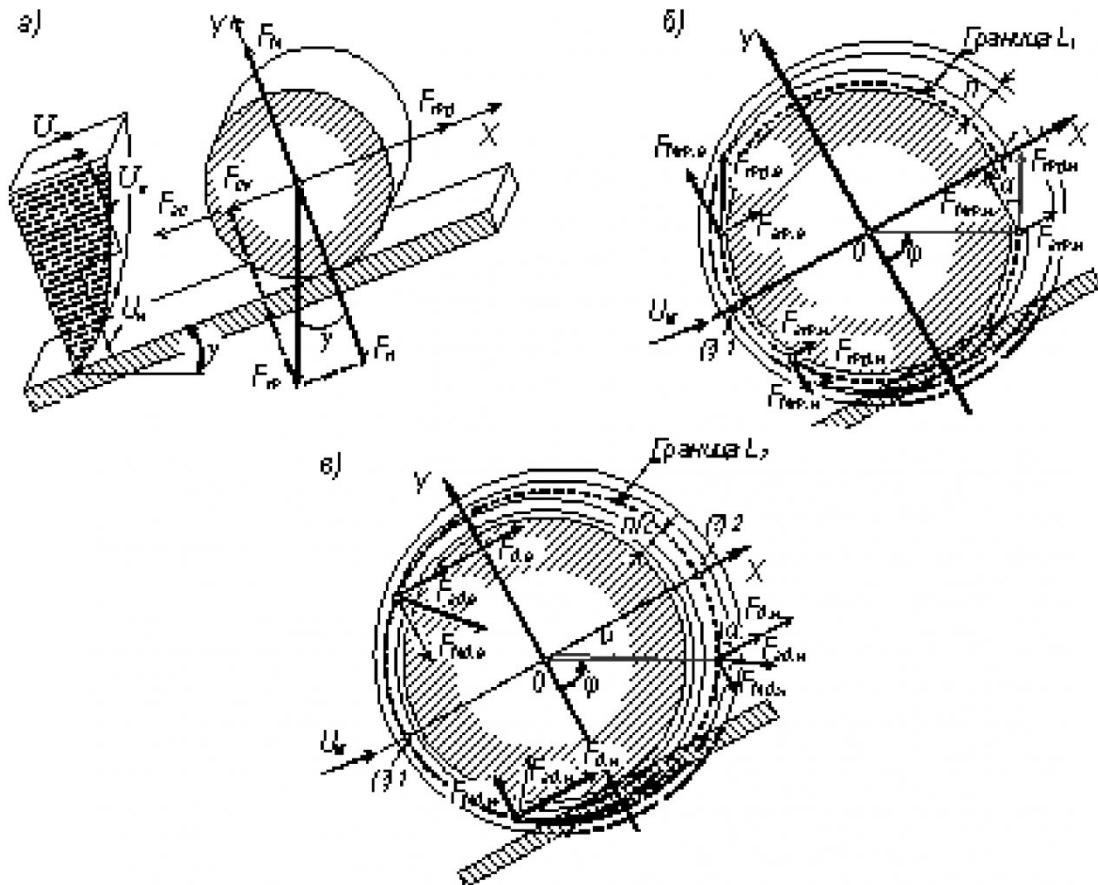


Рис.1. Схемы к расчету сил, действующих на частицу твердого в момент трогания:

- а) общая схема гидродинамических и гравитационных сил;
- б) силы сопротивления и подъема, образованные гидравлическим трением;
- в) силы сопротивления и подъема, образованные гидродинамическим давлением

да, а боковая поверхность располагается на стенке трубопровода (рис. 1.а). Для принятой формы частицы расчет гидродинамических сил производится в плоскости их изменения, а боковые гидродинамические силы учитываются с помощью коэффициентов моделирования.

Уравнение движения частицы, имеющей форму цилиндра диаметром  $d$  и высотой  $h=d$ , имеет вид

$$F_{ec} - F_m \sin \gamma \leq k_{mp} (F_m \cos \gamma - F_N), \quad (1)$$

где  $F_{ec}$  – сила гидродинамического сопротивления частицы потоку жидкости,  $F_N$  – подъемная сила, обусловленная градиентом скорости на стенке трубопровода,  $F_m$  – сила тяжести с учетом выталкивающей силы Архимеда,  $k_{mp}$  – коэффициент трения,  $\gamma$  – угол наклона трубопровода.

Так как воздействие движущейся жидкости на покоящееся твердое тело определяется гидродинамическим давлением и трением по его поверхности, то сила полного гидродинамического сопротивления и подъемная сила соответственно

$$F_{ec} = F_{em} + F_{ed}, \quad (2)$$

$$F_N = F_{Nm} + F_{Nd}, \quad (3)$$

где  $F_{em}$  и  $F_{Nm}$  – составляющие сил гидродинамического сопротивления и подъема, сформированные силой вязкого гидравлического трения;  $F_{ed}$  и  $F_{Nd}$  – силой гидродинамического давления потока.

Элементарные силы гидравлического трения и гидродинамического давления потока определяются соответственно по известным формулам [7]

$$f_m = \mu \frac{U}{n}, \quad f_d = \rho_{жк} U^2, \quad (4)$$

где  $\mu$  – вязкость жидкости,  $\rho_{жк}$  – плотность жидкости,  $n$  – толщина пристеночного слоя жидкости на поверхности частицы,  $U$  – скорость жидкости.

Полное гидродинамическое сопротивление частицы потоку жидкости определяется по формуле (2) с учетом элементарных сил (4)

$$F_{ec} = \int_{L_1} \mu \frac{U}{n} h \sin(\alpha) dL + \int_{L_2} \rho_{жк} U^2 h \sin^2(\alpha) dL, \quad (5)$$

где  $L_1$ ,  $L_2$  – граница формирования сил, образованных гидравлическим трением и гидродинамическим давлением соответственно;  $h$  – высота частицы,  $\alpha$  – угол наклона элементарной площадки.

Аналогично полная сила гидравлического подъема частицы в потоке определяется выражением (3) с использова-

нием (4)

$$F_N = \int_{L_1}^U \mu \frac{U}{n} h \cos(\alpha) dL + \\ + \int_{L_2} \rho_{\infty} U^2 h \sin(\alpha) \cos(\alpha) dL. \quad (6)$$

Толщина  $n$  пристеночного слоя неустановившегося потока движения жидкости по поверхности частицы от  $(\cdot) 1$  до  $(\cdot) 2$  (рис. 1.б, в) определяется суммой пристеночного, граничного  $a_n$  и расширяющегося турбулентного  $a_m$  слоев жидкости  $n = 2a_n + a_m$ ,  $a_m = l \cdot \operatorname{tg}(i)$ ,

$$a_n = \frac{2\delta^2}{d + 2m + 2\delta},$$

где  $\delta$  – максимальная толщина пристеночного слоя жидкости, м;  $m$  – толщина адгезионного слоя на поверхности частицы, м;  $l$  – расстояние, пройденное жидкостью по поверхности частицы, м;  $i$  – угол расширения турбулентного слоя.

Граница интегрирования  $L_1$  для составляющих сил, сформированных гидравлическим трением в слоях жидкости на поверхности частицы от  $(\cdot) 1$  до  $(\cdot) 2$ , определяется диаметром частицы и толщиной адгезионной пленки на ее поверхности. Граница интегрирования  $L_2$  для составляющих сил сопротивле-

ния и подъема, сформированных гидродинамическим давлением потока, включает в себя совокупность адгезионного слоя  $m$ , первого пристеночного слоя  $a_n$  и половину расширяющегося турбулентного слоя  $a_m$ , образованную углом расширения  $i/2$  (рис. 1.в).

Рассмотрим верхний и нижний участки потока жидкости, для которых определяются средние скорости [7]

$$U_e = C_c k_e \frac{2}{d} \int_{d/2}^d U(x) dx, \\ U_h = k_h \frac{2}{d} \int_0^{d/2} U(x) dx, \quad (7)$$

где  $U(x)$  – степенной закон распределения скорости жидкости;  $C_c$  – коэффициент стеснения, учитывающий влияние стенок трубопровода;  $k_e$ ,  $k_h$  – коэффициенты перехода от плоского потока к объемному.

Подставляя значения сил (5) и (6) в (1), определим скорость трогания одиночной частицы через параметры обтекающего ее слоевого потока и характеристики внешнего потока жидкости в трубопроводе, а также учитывающие крупность плотность транспортируемой частицы и угол наклона трубопровода :

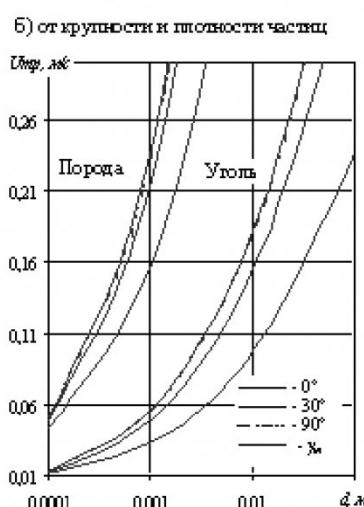
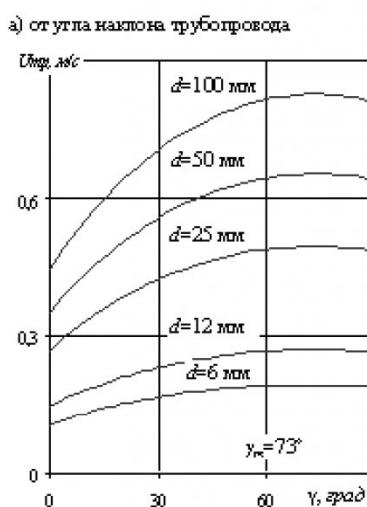


Рис. 2. Зависимость скорости трогания одиночных частиц от параметров транспортируемого материала и трубопровода при его диаметре  $D=300$  мм

$$\int_{L_1} \mu \frac{U}{n} h \sin(\alpha) dL + \\ + \int_{L_2} \rho_{\infty} U^2 h \sin^2(\alpha) dL - F_m \sin \gamma \\ \leq k_{mp} \left( F_m \cos \gamma - \int_{L_1} \mu \frac{U}{n} h \cos(\alpha) dL - \right. \\ \left. - \int_{L_2} \rho_{\infty} U^2 h \sin(\alpha) \cos(\alpha) dL \right) \quad (8)$$

Учитывая, что скорость частицы в момент трогания равна нулю, и, решая неравенство относительно скорости жидкости, получим

$$u_{mp} \geq -w_2/2w_1 + \\ + \sqrt{(w_2/2w_1)^2 + w_3/w_1};$$

$$w_1 =$$

$$= \left( U_e^2 + U_h^2 \right) \int_{L_2} \rho_{\infty} h \sin^2(\alpha) dL +$$

$$+ k_{mp} \left( U_h^2 - U_e^2 \right) \times$$

$$\times \int_{L_2} \rho_{\infty} h \sin(\alpha) \cos(\alpha) dL;$$

$$w_2 =$$

$$= \left( U_h + U_e \right) \int_{L_1} \frac{\mu}{n} h \sin(\alpha) dL +$$

$$+ k_{mp} \left( U_h - U_e \right) \times$$

$$\times \int_{L_1} \frac{\mu}{n} h \cos(\alpha) dL;$$

$$w_3 = \frac{\pi d^3}{6} (\rho_m - \rho_{\infty}) \times \\ \times g (\sin \gamma + k_{mp} \cos \gamma), \quad (9)$$

где  $w_1$ ,  $w_2$ ,  $w_3$  – условные обозначения групп параметров.

Численное моделирование позволяет установить зависимости скорости трогания одиночных частиц от исследуемых параметров.

С увеличением крупности или плотности частиц скорости трогания увеличиваются по квадратичному закону за счет изменения размеров слоя обтекания  $n$  частицы, величина которого устанавливает долевое участие сил гидродинамического давления и трения в формировании общего гидродинами-

ческого сопротивления и подъема, и ее массы, определяющей гравитационные силы (рис. 2.а).

При увеличении угла наклона трубопровода  $\gamma$  изменяется соотношение гравитационных сил, участвующих в формировании скорости трогания частицы (рис. 2.б). Установлено максимальное сопротивление частиц движению потока жидкости, выражаемое максимальной скоростью трогания, достигаемой при угле наклона трубопровода  $\gamma_m$

$$\gamma_m = \arccos(k_{mp}). \quad (10)$$

Из (10) следует, что угол наклона трубопровода  $\gamma_m$ , для которого скорости трогания частиц максимальны определяется коэффициентом трения  $k_{mp}$ , значения которого устанавливаются в зависимости от шероховатости транспортируемого материала и внутренней поверхности труб [8] (табл. 2).

Сходимость полученной расчетной зависимости скорости трогания частиц с опытными данными, на примере частиц угля и породы крупностью от 1,5 до 50 мм в горизонтальных трубопроводах диаметром 63 и 75 мм, приведенными в [5], представлена в виде зависимости числа Фруда  $Fr(\delta)$  от отно-

Таблица 2 . Коэффициенты трения углей и породы

Материал труб		<i>Шлакоситалл С-700</i>	<i>Ст.3</i>
Класс обработки		5	7
Транспортируемый материал	Уголь	Д	0,335
		Г	0,376
		Ж	0,367
		ОС	0,347
		А	0,320
	Аргиллит		0,403
			0,289
			0,349
			0,354
			0,431
			0,352
			0,390

шения диаметра частицы к диаметру трубопровода  $\delta=d/D$ , где  $Fr=(\rho_m - \rho_{ж})/\rho_{ж}gd/u_{mp}^2$  (рис.3).

Рассмотренная методика позволяет аналитически определять характеристики движения частиц в большом диапазоне вариирования условий их движения, что трудно достичь при экспериментальных исследованиях. Результаты моделирования могут быть использованы при разработке и определении оптимальных параметров гидротранспортирования твердых материалов.

Применение рассмотренной модели к анализу процессов движения частиц твердого в трубопроводах с различными углами наклона позволяет сделать следующие выводы.

1. Предложенный метод расчета скорости потока жидкости, необходимой для трогания

частицы учитывает основные параметры: крупность и плотность транспортируемого материала, а также угол наклона трубопровода. Методика позволяет моделировать указанные параметры процесса при изменении плотности и вязкости транспортирующей жидкости, диаметра и шероховатости трубопровода и шероховатости транспортируемого материала.

2. При увеличении крупности частиц их скорости трогания возрастают за счет изменения толщины пристеночного слоя на их поверхности, величина которого устанавливает долевое участие сил гидродинамического давления и трения в формировании сил гидродинамического сопротивления и подъема, а также увеличения массы частицы.

3. При увеличении плотности скорости трогания частиц также возрастают за счет изменения массы частицы.

4. При увеличении угла наклона трубопровода скорости трогания частиц возрастают, при угле наклона трубопровода  $\gamma_m$  достигают своего максимума и при дальнейшем росте угла наклона до  $90^\circ$  убывают до некоторого значения. Существование максимального сопротивления частиц движению потока жидкости обусловлено изменением соотношения гравитационных сил, действующих на частицу в наклонном трубопроводе. Значение угла наклона трубопровода  $\gamma_m$ , при котором скорости трогания частиц принимают максимальные значения, определяется коэффициентом трения.

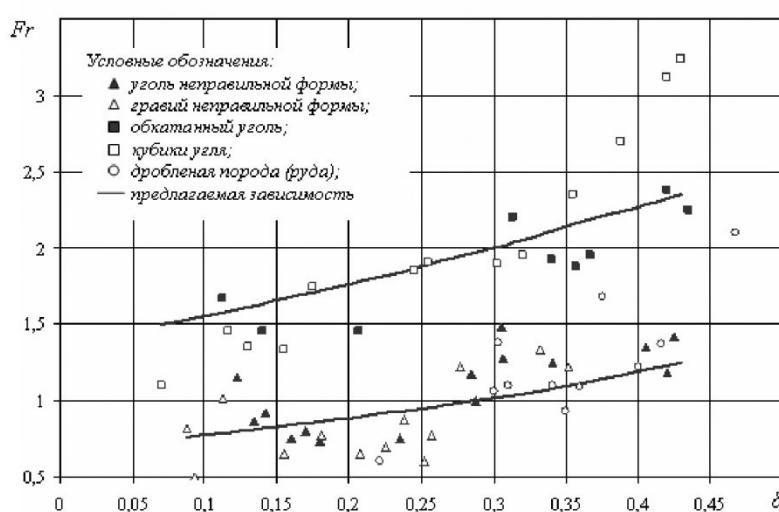


Рис.3. Сходимость расчетной и экспериментальной скорости трогания  $u_{mp}$  частиц, выраженных через число Фруда  $Fr$  для крупности частиц  $d=1,5\div50\text{мм}$ , при плотности угля  $\rho_y=1300\text{ кг}/\text{м}^3$ , плотности гравия и породы  $\rho_n=2650\text{ кг}/\text{м}^3$  в горизонтальном трубопроводе

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юфин А.П. Определение потерь напора при гидротранспорте мелких фракций угля по горизонтальным трубам. – Сб. «Гидравлика сооружений и динамика русел». – М.: Изд-во АН СССР, 1959. – 126с.
2. Мучник В.С. Опыт подземной добычи угля гидравлическим способом и пути его совершенствования. – М.: Углехиздат, 1956. – 224с.
3. Кнороз В.С. Движение гидросмесей в напорных трубопроводах и метод расчета. – М.: Известия ВНИИГ, т.30, 1941. – 256с.
4. Технические указания по расчету напорного гидравлического транспорта грунтов. – ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. – Л.: Энергия, 1967. – 45с.
5. Трайнис В.В. Параметры и режимы гидравлического транспортирования угля по трубопроводам. – М.: Наука, 1970. – 192с.
6. Смоловцев А.Е. Трубопроводный транспорт. – М.: Недра, 1980. 293с.
7. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. – М.: Издательство иностранной литературы, 1956. 528с.
8. Справочник по обогащению углей / Под ред. И.С. Благова, А.М. Коткина, Л.С. Зарубина. 2-е изд. – М.: Недра, 1984. 614с.

Автор статьи:

Коровина  
Юлия Викторовна  
– аспирант каф. экологии и естествознания (Новокузнецкий филиал-институт КемГУ)

**УДК 622.271.333:626:550.372**

**Е. В. Костюков, С. М. Простов, С. П. Бахаева**

### **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТЕХНОГЕННОГО МАССИВА ГИДРООТВАЛА**

Значительная часть горнодобывающих предприятий Кузбасса разрабатывают месторождения каменного угля с 1950–60 гг. На современном этапе развития горные работы приближаются к конечной глубине отработки, а балансовых запасов остается на 10–15 лет эксплуатации. Дальнейшая работа таких предприятий зависит, главным образом, от освоения прилегающих участков, разработка которых в ряде случаев осложнена горно-геологическими или техногенными условиями. К неблагоприятным относятся территории, представляющие собой замытые до проектных отметок и законсервированные гидроотвалы.

С целью освоения дополнительных запасов угля Кедровский угольный разрез с 2002 года ведет гидромеханизированный смыв намывных отло-

жений гидроотвала № 3. Для изучения состава, строения и свойств массива были выполнены инженерно-геологические и гидрогеологические изыскания, которые включали бурение трех скважин, отбор и лабораторные исследования монолитов намывных грунтов и последующую установку в скважинах датчиков порового давления для периодических наблюдений (рис. 1) [1].

Сеть датчиков порового давления представляет собой станцию гидрогеомеханического мониторинга, которая предназначена для организации непрерывных наблюдений за изменением порового давления и развития опасных деформаций массива во время ведения гидромеханизированных работ [2]. Анализ эпюр распределения избыточного порового давления и инженерно-геологического

строения массива (рис. 1) показывает, что изменение статического напряженного состояния массива в районе скв. № 1 произошло в результате отсыпки ограждающей перемычки из скальных вскрышных пород разреза на поверхности гидроотвала [3]. Формирование статического напряженного состояния в районе скв. № 2 связано с наличием слоя дресвеинистого грунта мощностью более 20 м в верхней части разреза. В районе скв. № 3 наблюдается незначительное увеличение порового давления в средней части намывного слоя под действием собственного веса грунтов.

Анализ результатов гидрогеомеханического мониторинга позволяет оценивать напряженное состояние массива в отдельных точках в пределах сети наблюдательных скважин на