© Ю.В. Коровина, 2007

УДК 532.542 + 532.574

Ю.В. Коровина

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДВИЖЕНИЯ ЧАСТИЦ ТВЕРДОГО В НАКЛОННЫХ ТРУБОПРОВОДАХ

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. Так же не окончательно решен 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 применения по одному или нескольким параметрам: крупности транспортируемого материала d; плотности твердого ρ; углу наклона трубопровода γ (табл. 1).

Данные по методам расчета параметров напорного гидротранспорта, приведенные в табл. 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. Эпюрой распределения скорости жидкости по поперечному сечению трубопровода, что приводит:

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

Таблица 1

Область применения известных методов расчета напорного гидротранспорта

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

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 трубопровода, 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

$$F_{гс} - F_{т}\sin\gamma \le k_{тр}\left(F_{т}\cos\gamma - F_{N}\right), \qquad (1)$$

где $F_{гс}$ – 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, $k_{тр}$ - коэффициент трения, γ – 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 равны соответственно

$$F_{гс} = F_{гт} + F_{гд}, \qquad (2)$$

$$F_{N} = F_{Nт} + F_{Nд}, \qquad (3)$$

где $F_{гт}$ и $F_{Nт}$ – составляющие сил гидродинамического сопротивления и подъема, сформированные силой вязкого гидравлического трения; $F_{гд}$ и $F_{Nд}$ - силой гидродинамического давления потока.

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

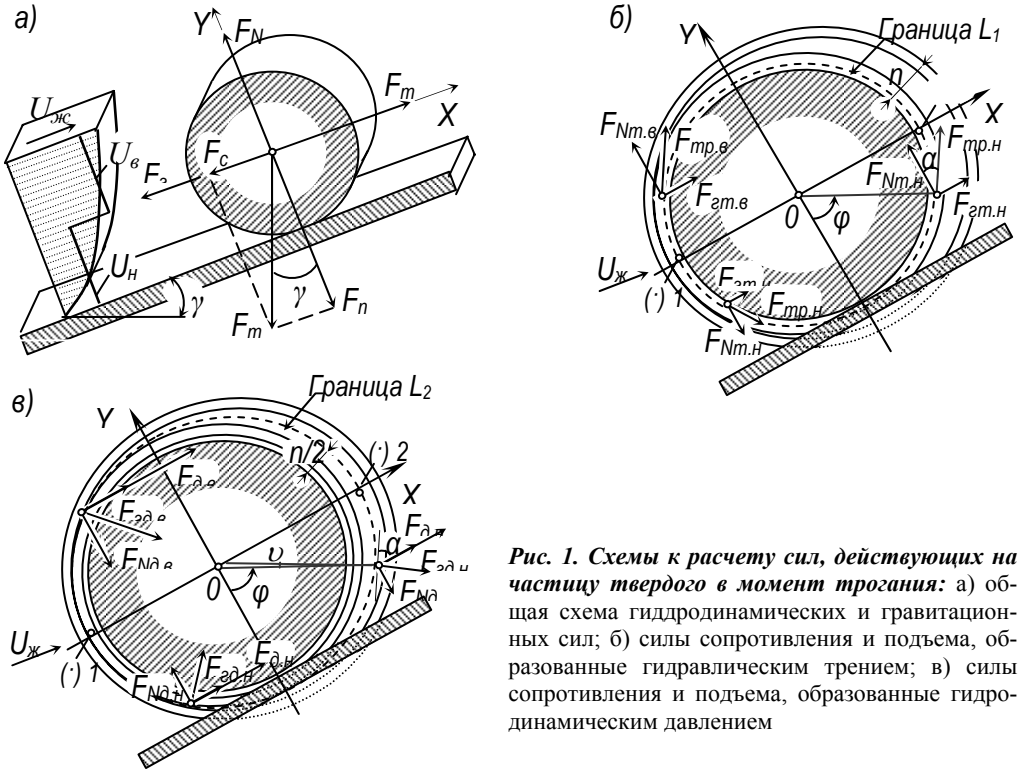

Рис. 1. Схемы к расчету сил, действующих на частицу твердого в момент трогания: а) общая схема гиддродинамических и гравитационных сил; б) силы сопротивления и подъема, образованные гидравлическим трением; в) силы сопротивления и подъема, образованные гидродинамическим давлением

$$f_т = \mu \frac{U}{n} \text{ и } f_д = \rho_ж U^2, \qquad (4)$$

где μ – вязкость жидкости, $\rho_ж$ – 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)

$$F_{гс} = \int_{L_1} \mu \frac{U}{n} h \sin(\alpha) dL + \int_{L_2} \rho_ж U^2 h \sin^2(\alpha) dL, \qquad (5)$$

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

Аналогично полная сила гидравлического подъема частицы в потоке определяется выражением (3) с использованием (4)

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

Толщина n пристеночного слоя неустановившегося потока движения жидкости по поверхности частицы от (·) *1* до (·) *2* (рис. 1, *б*, *в*) определяется как сумма пристеночного, граничного $a_п$ и расширяющегося турбулентного $a_т$ слоев жидкости

$$n = 2a_п + a_т,$$

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

$$a_т = l \cdot tg(i),$$

где δ – 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 (·) *1* до (·) *2*, определяется диаметром частицы и толщиной адгезионной пленки на ее поверхности. Граница интегрирования L_2 для составляющих сил сопротивления 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 два участка потока жидкости: верхний $U_в$ и нижний $U_н$, для которых определяются средние скорости по формулам [7]

$$U_в = C_c k_в \frac{2}{d} \int_{d/2}^{d} U(x)dx,$$

$$U_н = k_н \frac{2}{d} \int_{0}^{d/2} U(x)dx, \qquad (7)$$

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

Подставляя значения сил (5) и (6) в формулу (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

$$\int_{L_1} \mu \frac{U}{n} h \sin(\alpha) dL + \int_{L_2} \rho_ж U^2 h \sin^2(\alpha) dL - F_т \sin\gamma \le$$

$$\le k_{тр}\left(F_т \cos\gamma - \int_{L_1} \mu \frac{U}{n} h \cos(\alpha) dL - \int_{L_2} \rho_ж U^2 h \sin(\alpha)\cos(\alpha) dL \right). \qquad (8)$$

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

$$u_{тр} \ge -w_2/2w_1 + \sqrt{(w_2/2w_1)^2 + w_3/w_1} \qquad (9)$$

$$w_1 = \left(U_в^2 + U_н^2\right) \int_{L_2} \rho_ж h \sin^2(\alpha) dL + k_{тр}\left(U_н^2 - U_в^2\right) \int_{L_2} \rho_ж h \sin(\alpha)\cos(\alpha) dL,$$

$$w_2 = \left(U_н + U_в\right) \int_{L_1} \frac{\mu}{n} h \sin(\alpha) dL + k_{тр}\left(U_н - U_в\right) \int_{L_1} \frac{\mu}{n} h \cos(\alpha) dL,$$

$$w_3 = \frac{\pi d^3}{6}\left(\rho_т - \rho_ж\right) \times g\left(\sin\gamma + k_{тр}\cos\gamma\right),$$

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

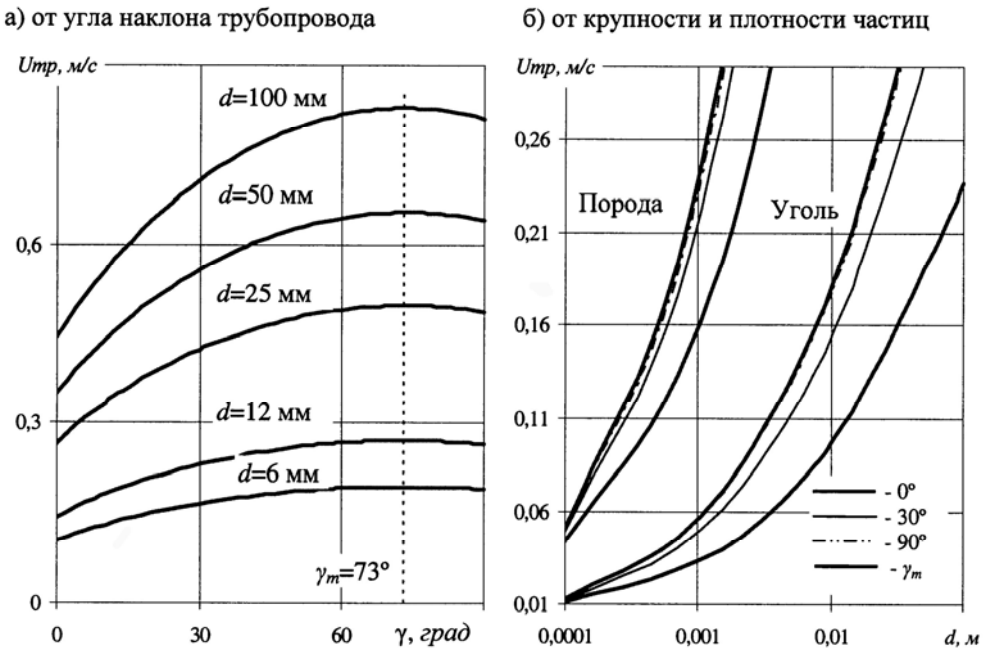

Рис. 2. Зависимость скорости трогания одиночных частиц от параметров транспортируемого материала и трубопровода при его диаметре D = 300 мм

n частицы, величина которого устанавливает долевое участие сил гидродинамического давления и трения в формировании общего гидродинамического сопротивления и подъема, и ее массы, определяющей гравитационные силы (рис. 2, *а*).

При увеличении угла наклона трубопровода γ 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 γ_m, значение которого определяется по формуле

$$\gamma_m = \mathrm{arcctg}(k_{тр}). \qquad (10)$$

Из выражения (10) следует, что угол наклона трубопровода γ_m, для которого скорости трогания частиц максимальны определяется коэффициентом трения $k_{тр}$, значения которого устанавливаются

Таблица 2

Коэффициенты трения углей и породы

Материал труб			Шлакоситалл С-700		Ст.3
Класс обработки			5	7	7
Транспортируемый материал	Уголь	Д	0,335	0,289	0,364
		Г	0,376	0,271	0,349
		Ж	0,367	0,338	0,354
		ОС	0,347	0,315	0,431
		А	0,320	0,200	0,352
	Аргиллит		0,403	0,309	0,390

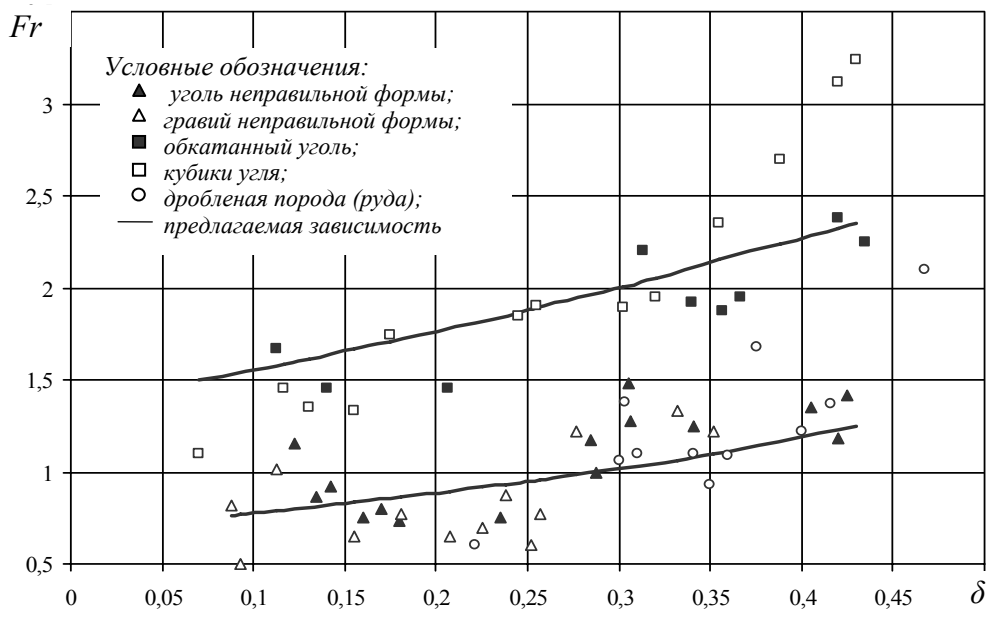

Рис. 3. Сходимость расчетной и экспериментальной скорости трогания $u_{тр}$ частиц, выраженных через число Фруда Fr для крупности частиц d = 1,5÷50 мм, при плотности угля $\rho_у$ = 1300 кг/м^3, плотности гравия и породы $\rho_п$ = 2650 кг/м^3 в горизонтальном трубо проводе

в зависимости от шероховатости транспортируемого материала и внутренней поверхности труб [8] (табл. 2).

Сходимость полученной расчетной зависимости скорости трогания час-тиц с опытными данными, на примере частиц угля и породы крупностью от 1,5 до 50 мм в горизонтальных тру-бопроводах диаметром 63 и 75 мм, приведенными в работе [5], представлена в виде зависимости числа Фруда $Fr(\delta)$ от отношения диаметра частицы к диаметру трубопровода δ, где $\delta = d/D$ и $Fr = (\rho_т - \rho_ж)/\rho_ж gd/u^2_{тр}$ (рис. 3).

Рассмотренная методика позволяет аналитически определять характеристики движения частиц в большом диапазоне варьирования условий их движения, что трудно достичь при экспериментальных исследованиях. Результаты моделирования могут быть использованы при разработке и оп-ределении 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 скорость трогания частиц также возрастает за счет изменения массы частицы.

4. При увеличении угла наклона трубопровода скорости трогания частиц возрастают, при угле наклона трубопровода γ_m достигают своего максимума и при дальнейшем росте угла наклона до 90º 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 γ_m, при котором скорости трогания частиц принимают максимальные значения, определяется коэффициентом трения.

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. – 126 с.

2. *Мучник В.С.* Опыт подземной добычи угля гидравлическим способом и пути его совершенствования. – М.: Углетехиздат, 1956. – 224 с.

3. *Кнороз В.С.* Движение гидросмесей в напорных трубопроводах и метод расчета. – М.: Известия ВНИИГ, т.30, 1941. – 256 с.

4. *Технические* указания по расчету напорного гидравлического транспорта грунтов. – ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. – Л.: Энергия, 1967. – 45 с.

5. *Трайнис В.В.* Параметры и режимы гидравлического транспортирования угля по трубопроводам. – М.: Наука, 1970. – 192 с.

6. *Смолдырев А.Е.* Трубопроводный транспорт. – М.: Недра, 1980. 293с.

7. *Шлихтинг Г.* Теория пограничного слоя. – М.: Издательство иностранной литературы, 1956. 528 с.

8. *Справочник* по обогащению углей / Под ред. И.С. Благова, А.М. Коткина, Л.С. Зарубина. 2-е изд. – М.: Недра, 1984. 614 с. ГИАБ

Коротко об авторах

Коровина Ю.В. – Новокузнецкий филиал-институт Кемеровского государственного университета, г. Новокузнецк.

Статья представлена Новокузнецким филиалом - институтом ГОУВПО «Кемеровский государственный университет.

Рецензенты: *Цинкер Л.М.,* доктор технических наук, ВОСТНИГРИ,

Фрянов В.Н., доктор технических наук, Сибирский государственный индустриальный университет.