времени, на данном этапе для создания математической модели системы управления шахтным водоотливом можно использовать биномиальное распределение для прогнозирования отклонения от среднего. При применении ультразвуковых датчиков уровня воды в водосборнике точность прогноза станет более высокой.

Поскольку водосборник является интегрирующим звеном, величина ошибки прогноза не будет оказывать решающего влияния на моменты времени включения насосов.

Аппаратное решение предлагаемой системы управления ШВУ можно представить в виде структурной схемы (рис.2).

Научный руководитель профессор, д.т.н. *А.Д.Школьников*

УДК 622.692.4:621.81.002.02

В.А.СВИРСКИЙ
Горно-электромеханический факультет,
студент группы ММ-97, ассистент профессора

ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ ТРАНСПОРТИРОВАНИЕ ВЫСОКОКОНЦЕНТРИРОВАННЫХ ВОДОУГОЛЬНЫХ СУСПЕНЗИЙ

При совершенствовании технологии приготовления на первой стадии производства водоугольные суспензии (ВУС) по своим энергетическим показателям не уступают таким традиционным видам энергетического топлива, как нефть или газ, так как относятся к углеводородной группе энергетического сырья. Поскольку большинство угледобывающих предприятий расположено на значительных расстояниях от промышленно развитых регионов, вопросы гидравлического транспортирования приготовленных ВУС имеют первостепенное значение.

По своим физико-механическим характеристикам ВУС являются неньютоновскими жидкостями, гидравлическое транспортирование которых в наиболее выгодных режимах может быть обеспечено лишь при полном исследовании зависимости реологических свойств суспензий от крупности угольных частиц и их объемного содержания.

В статье на основе анализа экспериментальных данных, полученных в лаборатории гидравлического транспорта руды и продуктов ее переработки, предлагается для расчета реологических параметров ВУС рассматривать их как ньютоновские жидкости, а неньютоновские свойства определять поправкой Рабиновича с использованием структурного числа.

Адекватность полученных расчетных формул в дальнейшем должна быть подтверждена дополнительными исследованиями.

While improving the preparation process at the first stage of production, water-and-coal suspensions (WCS) possess power indices, which are not inferior to such common types of fuel as oil or natural gas, for they belong to a hydrocarbon group of power raw materials. As the majority of coal mining companies are situated at a considerable distance from industrially developed regions, the problems of hydraulic transportation of prepared WCS are of paramount importance.

VCS by their physical-and-mechanical characteristics are non-Newtonian fluids, the hydraulic transportation of which under the most advantageous conditions may be ensured only due to studying the dependence of rheology of suspensions properties on coal particles lump size and their volume content.

The paper, that is based on the analysis of the experimental data, obtained in the laboratory of hydraulic transport of ore and products of its processing, proposes to consider VCS as Newtonian fluids to analyze VCS rheological parameters, and suggests non-Newtonian properties should be determined by the use of Rabinovich's correction.

The adequacy of the design formulae obtained is to be further verified by complementary investigations.

Отечественный и зарубежный опыт гидравлического транспортирования угля показывает, что определяющим фактором экономического транспортирования водоугольных суспензий (ВУС) является размер частиц угля. При этом можно выделить следующие типы угольных суспензий: нормальная угольная суспензия с гранулометрическим составом частиц в диапазоне фракций 0-1 мм; среднедисперсные суспензии с гранулометрическим составом угольных частиц, охватывающим диапазон 0-8 мм; крупнодисперсные угольные суспензии, гранулометрический состав которых находится в диапазоне крупностей частиц угля от 0 до 70 мм; высококонцентрированные угольные суспензии с концентрацией угольных частиц 70 % и выше.

Применение в энергетике высоко концентрированных угольных суспензий наиболее эффективно, так как они могут сжигаться непосредственно в камерах сгорания газотурбинных установок (ГТУ) и в паровых котлах большой мощности без предварительного обезвоживания.

В данной работе приводятся некоторые, измеренные в лабораторных условиях, реологические константы для трех типов ВУС с массовыми концентрациями угольных частиц 47, 60 и 70 %.

Расчеты для ВУС, представленной как ньютоновская жидкость. Транспортирование угольных с высокой концентрацией частиц обосновано тем, что для таких смесей применим ламинарный режим течения при условии обеспечения стабильности суспензии. В первом приближении предполагается, что суспензия представляет собой ньютоновскую жидкость, хотя в действительности таковой она не является. Основные параметры потока суспензии определяются из реологического уравнения для вязкой ньютоновской жидкости

$$\tau = \mu \frac{dv}{dr} = \mu \dot{\gamma}, \qquad (1)$$

где τ – напряжение сдвига на стенке трубопровода, Па; μ – динамический коэффициент вязкости жидкости, Па·с; dv/dr – градиент скорости в поперечном сечении трубопровода в направлении от оси потока к стенке трубопровода с радиусом R; dr – изменение радиуса потока в поперечном сечении, м.

Напряжение сдвига на стенке трубопровода определяется из равенства нормальных и касательных сил, действующих в потоке жидкости:

$$(\pi D^2 / 4)\Delta P = \pi D L \tau,$$

откуда

$$\tau = \Delta P D / 4L, \qquad (2)$$

где ΔP – перепад давления в потоке, Па, на отрезке трубопровода длиной L, м.

Из (2) получим формулу для потерь напора при течении жидкостей в ламинарном режиме следующим образом:

$$\tau = \frac{\rho g h D}{4L} = i \frac{\rho g D}{4}, \qquad (3)$$

где ρ – плотность жидкости, кг/м^3; g – ускорение свободного падения, м^2/с; i – потери напора по длине трубопровода.

Величина градиента скорости $\dot{\gamma}$ в формуле (1) с учетом поправки Рабиновича* имеет вид

$$\dot{\gamma} = \frac{dv}{dr} = k \frac{8v}{D}, \qquad (4)$$

где k – поправка Рабиновича, характеризующая структуру текущей жидкости, для ньютоновской жидкости $k = 1$.

* *Metzner A.B.* Advances in Chemical Engineering. Academic Press Inc., New York. 1956. V.1.

В общем случае поправка Рабиновича определяется структурным числом

$$k = 3n + 1/4n,$$

где n – структурное число, при $n = 1$ $k = 1$.

С учетом формул (3) и (4) реологическое уравнение (1) запишем в следующем виде:

$$i\frac{\rho g D}{4} = k\mu\frac{8v}{D}, \qquad (5)$$

из которого получим формулу для удельных потерь напора i:

$$i = k\mu\frac{32v}{\rho g D^2} = k\frac{64}{\mathrm{Re}}\frac{v^2}{2gD}, \qquad (6)$$

где Re – число Рейнольдса.

Поправка k определяет степень отклонения ньютоновской жидкости от неньютоновской. Значение k определяется экспериментальным путем при исследовании течений ВУС по трубопроводам. С этой целью запишем обобщенный коэффициент гидравлических сопротивлений в следующем виде:

$$\lambda_n = k\lambda, \qquad (7)$$

где λ_n – обобщенный коэффициент гидравлических сопротивлений; $\lambda = 64/\mathrm{Re}$ – коэффициент гидравлических сопротивлений при течении вязких ньютоновских жидкостей (коэффициент Дарси – Вейсбаха).

В итоге формула для определения потерь напора при течении угольных гидросмесей по трубопроводам будет иметь вид

$$i = \lambda_n\frac{v^2}{2gD}, \qquad (8)$$

где v – средняя скорость потока суспензии.

Экспериментальные результаты. Эксперименты проводились несколько лет тому назад в отраслевой лаборатории гидравлического транспортирования руды и продуктов ее переработки на испытательном стенде.* Приготовленные для гидравлического транспортирования угольные суспензии с массовыми концентрациями $c_p = 0,47$; 0,6 и 0,7 перекачивались по трубопроводу диаметром $D = 50,8$ мм. Гранулометрический состав частиц измельченного в лабораторной валковой мельнице интинского угля был представлен в основном частицами мелких фракций. Класс минус 74 мкм составлял 90 % в объеме пробы. В процессе экспериментов измерялся расход суспензии с помощью мерного бака объемно-весовым способом. По величине расхода рассчитывалась средняя скорость потока суспензии. Каждый эксперимент проводился не менее 5 раз. Результаты обрабатывались, усреднялись и заносились в журнал наблюдений. Опытные данные приведены в табл.1.

Зависимости течения характеризуют исследованные угольные суспензии как реологические. В диапазоне скоростей от 0,6 до 1 м/с имеется линейная зависимость потерь напора от скорости течения. С увеличением скорости течения потери напора возрастают. В процессе обработки экспериментальных результатов были рассчитаны значения напряжения сдвига по формуле (3), а также значение градиента скорости по формуле (4), в которой было принято $k = 1$. По формуле (5) рассчитывалось значение динамического коэффициента вязкости μ и определялось число Рейнольдса, которое изменялось от наименьшего $\mathrm{Re} = 764$ (при $c_p = 70$ % и $v = 0,5$ м/с) до $\mathrm{Re} = 2038$ (при $c_p = 47$ % и $v = 1$ м/с). С увеличением скорости течения наблюдается турбулентный режим течения. По величине числа Re и средней скорости потока были вычислены значения коэффициента гидравлических сопротивлений по формуле $\lambda = 64/\mathrm{Re}$, обобщенного коэффициента гидравлических сопротивлений по формуле (8), коэффициента k в формуле (6) и в соответствии с формулой (7) структурного числа n, входящего в поправку Рабиновича. Расчетные параметры приведены в табл.2.

Дальнейший анализ полученных экспериментальных данных позволит получить общую зависимость структурного числа от параметров водоугольных суспензий (концентрации, вязкости, средней скорости потока и

* *Александров В.И.* Методы снижения энергозатрат при гидравлическом транспортировании смесей высокой концентрации / Санкт-Петербургский горный ин-т. СПб, 2000.

Таблица 1

Опытные данные при течении водоугольной суспензии по экспериментальному трубопроводу

Средняя скорость потока, м/с	Потери напора, м,при массовой (объемной) концентрации, %			
	47 (40,5)	60 (53,5)	70 (62,4)	Вода
0,5	0,0726	0,0889	0,1214	0,004102
0,75	0,0834	0,1040	0,1349	0,00923
1	0,0975	0,1252	0,1485	0,01641
1,5	0,1322	0,1680	0,1891	0,03692
1,8	0,1626	0,1919	0,2217	0,05316
2	0,1810	0,2168	0,2515	0,06564
2,3	0,2168	0,2542	0,3111	0,0868
2,5	0,2493	0,2975	0,3599	0,1025

Таблица 2

Расчетные параметры, вычисленные по результатам экспериментов

Параметр	c_p = 47 %			c_p = 60 %			c_p = 70 %		
	Re	λ_n	n	Re	λ_n	n	Re	λ_n	n
v, м/с:									
0,5	1019	0,289	0,065	928	0,354	0,057	764	0,484	0,049
0,75	1529	0,1478	0,091	1392	0,1843	0,077	1146	0,239	0,07
1	2038	0,0972	0,11	1856	0,1247	0,088	1529	0,148	0,091
Вязкость μ, Па·с	0,0279			0,03174			0,0396		

др.). По результатам выполненной работы можно сделать следующие выводы:

1. Для исследования течения водоугольных суспензий по трубопроводам можно применять реологическую модель, описывающую движение вязких ньютоновских жидкостей.

2. Неньютоновские свойства реальных водоугольных суспензий учитываются поправкой Рабиновича и структурным числом, значения которых зависят от коэффициента динамической вязкости суспензии и концентрации угольных частиц.

Научный руководитель доцент, к.т.н. *В.И.Александров*