

Таблица 6– Коэффициенты аппроксимации зависимости (5) и (6) для условий различных экспериментальных исследований

Характеристика СС	A	m	B	P
на основе углей Канчо-Ачинского бассейна, измельченных в циклической мельнице	14,098	0,8199	0,3068	0,1269
на основе углей Канчо-Ачинского бассейна, измельченных в цельпесбной мельнице	19,89	1,9855	0,9629	-0,3064
на основе углей Канчо-Ачинского бассейна различной зольности с добавкой пластификатора	0,2851	2,5954	0,9705	-0,2688
на основе угля шахты «Инская»	1,7459	0,9753	1,0281	0,9361

Совместное рассмотрение формул (3) – (6) позволяет впервые для рассматриваемых СС установить зависимость между PX закона Бингама-Шведова и выходом летучих углей, образующих твердую фазу суспензии (табл. 7):

$$\eta = A'e^{m'V^{daf}}, \quad (7)$$

$$\tau_0 = B'(84,29 - V^{daf})^{p'}. \quad (8)$$

Таблица 7 – Коэффициенты аппроксимации зависимости (7) и (8) для условий различных экспериментальных исследований

Характеристика СС	A'	m'	B'	p'
на основе углей Канчо-Ачинского бассейна, измельченных в циклической мельнице	0,0013	1,2197	$2,72 \cdot 10^{-11}$	7,8802
на основе углей Канчо-Ачинского бассейна, измельченных в цельпесбной мельнице	0,0542	0,5037	$9,93 \cdot 10^5$	-3,2637
на основе углей Канчо-Ачинского бассейна различной зольности с добавкой пластификатора	1,8126	-0,3853	$7,05 \cdot 10^6$	-3,7202
на основе угля шахты «Инская»	0,0320	1,0253	$1,02 \cdot 10^{-2}$	1,0683

Выводы. Обработка результатов исследований отечественных и зарубежных специалистов указывает на возможность применения реологических законов Освальда-Рейнера и Бингама-Шведова для описания реологических свойств СС в условиях геотехнологических систем. При этом рекомендуется модель псевдопластического течения Бингама-Шведова использовать при режимах, для которых характерно стержневое течение с недеформируемым ядром потока, исчезающим при увеличении скорости суспензии. А при режимах течения, отвечающих начальному участку реологической кривой, то есть до выхода на структурный режим, использовать формулу Освальда-Рейнера.

Впервые установлена зависимость между константами реологического закона Освальда-Рейнера и реологическими характеристиками, применяемыми в формуле Бингама-Швендова. Это позволило получить зависимость эффектив-

ной вязкости и начального касательного напряжения угольных структурированных суспензий от выхода летучих веществ на зольную массу частиц твердой фракции.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Круть, О.А. Водовугільне паливо / О.А. Круть. – К.: Наукова думка, 2002. – 172 с.
2. Світлий, Ю.Г. Гідравлічний транспорт твердих матеріалів / Ю.Г. Світлий, О.А. Круть. – Донецьк.: Східний видавничий дім, 2010. – 268 с.
3. Каненков, В.В. Снижение энергоемкости гидравлического транспортирования полидисперсных гидросмесей на предприятиях горной промышленности: дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.06 / Каненков В.В. – С.-Пб: ГГИ, 2006. – 150 с.
4. Альмагер, М.В. Обоснование технологической схемы и параметров комплекса для транспортирования высококонцентрированной гидросмеси на латеритовых карьерах (республика Куба): дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.06 / Альмагер М.В. – С.-Пб: ГГИ, 2006. – 140 с.
5. Авксентьев, С.Ю. Определение рациональных режимов гидротранспорта пастообразных хвостов обогащения медно-цинковой руды: дисс. ... кандидата техн. наук: 05.05.06 / Авксентьев С.Ю. – С.-Пб: ГГИ, 2009. – 129 с.
6. Білецький, В.С. Дослідження характеристик водовугільного палива залежно від властивостей вихідного вугілля / В.С. Білецький, О.А. Круть, Ю.Ф. Власов // Науковий вісник НГУ. – 2006. - №6. – 2006. – С. 46 – 49.
7. Круть, А.А. Технология приготовления водоугольного топлива с предварительным смешением исходных компонентов / А.А. Круть, Ф.А. Папаяни // Сбірник наукових праць НГУ. – Дніпропетровськ, 2001. – № 3. – С. 111 – 118.
8. Идентификация реологических параметров структурированных суспензий: отчет по НИР (промежуточный); г/б Ш-63-12 / ИГТМ НАН Украины; рук. НИР Блюсс Б.А. [и др.] - Днепрпетровск, 2014. – 79 с.. ГР 0112U000493 – Т. 10.
9. Semenenko, E. The method of hydraulic gradient and critical velocity calculation for hydrotransportation of particles with substantially different densities / E. Semenenko, N. Nykyforova, L. Tatarko // 15th International Freight Pipeline Society Symposium, June, 24-27, 2014, Prague, Czech Republic. – p. 248 – 256.

REFERENCES

1. Krut, O.A. (2002), *Water-coal fuel* [Hydrocarbon fuel], Naukova Dumka, Kiev, Ukraine.
2. Svitlyi, Yu.G. and Krut, O.A. (2010), *Gidravlichnyi transport tverdih materialiv* [Hydraulic transport of solid materials], Shidniy vidavnicхий dim, Donetsk, Ukraine.
3. Kanenkov, V.V. (2006), “Reducing the energy intensity of the hydraulic transportation polydispersion of slurries in the mining industry”, Ph.D. Thesis, GGI, St.-Petersburg, Russia.
4. Almager, M.V. (2006), “Substantiation of technological schemes and parameters of a complex for the transport of highly concentrated slurry laterite quarries (Republic of Cuba)”, Ph.D. Thesis, GGI, St.-Petersburg, Russia.
5. Avksentev, S.Yu. (2009), “The definition of rational modes of hydrotransport paste tailings of copper-zinc ore”, Ph.D. Thesis, GGI, St.-Petersburg, Russia.
6. Biletskiy, V.S. (2006), ” Study of characteristics of coal-water fuel, depending on the properties of the coal”, *Naukovyi visnyk Natsionalnogo girnychogo universytetu*, no.6, pp. 46 – 49.
7. Krut, A.A. and Papayani, F.A. (2001), “The technology of preparation of coal-water fuel with prior shmesani-eat source components”, *Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnogo girnychogo universytetu*, Dnepropetrovsk, Ukraine, no. 3, pp. 111-118.
8. IGTM NAS of Ukraine (2014), *Identifikatsiya reologicheskikh parametrov strukturirovannykh suspenziy* [Identification of rheological parameters of structured suspensions]: report on research projects (intermediate), IGTM NAS of Ukraine, Dnepropetrovsk, Ukraine.
9. Semenenko, E., Nykyforova, N., Tatarko, L. (2014), “The method of hydraulic gradient and critical velocity calculation for hydrotransportation of particles with substantially different densities”, 15th International Freight Pipeline Society Symposium, June, 24-27 2014, Prague, Czech Republic, p. 248 – 256.

Об авторах

Семененко Евгений Владимирович, доктор технических наук, старший научный сотрудник, заведующий отделом проблем шахтных энергетических комплексов, Институт геотехнической механи-

ки им. М.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАНУ), Днепропетровск, Украина, evs_igtm@mail.ru.

Демченко Татьяна Дмитриевна, магистр, инженер отдела проблем шахтных энергетических комплексов, Институт геотехнической механики им. М.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАНУ), Днепропетровск, Украина, kondratyuk.tania@yandex.ua.

About the authors

Semenenko Evgeniy Vlsdimirovich, Doctor of Technical Sciences (D. Sc.), Senior Researcher, Head of Department of Mine Energy Complexes, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, evs_igtm@mail.ru

Demchenko Tatiana Dmitrivna, Master of Science, Engineer in Department of Mine Energy Complexes, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, kondratyuk.tania@yandex.ua.

Анотація. Стаття спрямована на дослідження впливу властивостей твердої фази реологічної характеристики структурованої суспензії, а також на встановлення взаємозалежності параметрів реологічних законів Освальда-Рейнера і Бінгама-Шведова. Для аналізу були обрані результати дослідів вітчизняних і зарубіжних спеціалістів, які вказали на можливість застосування реологічних законів Освальда-Рейнера та Бінгама-Шведова для опису реологічних властивостей структурованої суспензії в умовах геотехнологічних систем. У статті проаналізовано результати експериментальних досліджень реологічних характеристик структурованих суспензій з вугілля різних марок. Вперше встановлена залежність між константами реологічного закону Освальда-Рейнера і реологічними характеристиками застосовуваними у формулі Бінгама-Швендова, а також отримана залежність ефективної в'язкості і початково дотичної напруги вугільних структурованих суспензій від виходу летких речовин на зольну масу частинок твердої фракції.

Ключові слова: структурована суспензія, ефективна в'язкість, реологічна характеристика, вугілля.

Abstract. This article focuses on studying influence of rheological properties of the structured suspension solid phase and on specifying interdependence between parameters of the Oswald-Rayner and Bingham-Shwedov rheological laws. Results of domestic and foreign experts' studies were selected for the analysis, which state a possibility to apply the Oswald Rayner and Bingham-Shwedov rheological laws for describing rheological properties of the structured suspension in geotechnical systems. The article analyzes experimental results on rheological characteristics of the structured suspensions of different coal grades. It is for the first time when a relationship was established between the constants of the Oswald-Rayner rheological law and rheological characteristics used in the Bingham-Shwedov formula, as well as dependence of effective viscosity and initial shear stress of the structured coal suspensions on volatile substances outlet to the ash mass in the solid fraction particles.

Keywords: structured suspension, effective viscosity, rheological characteristic, coal.

Стаття поступила в редакцію 31.08.2015.

Рекомендовано к печати д-ром техн. наук Б.А. Блюссом

УДК 662.210.587.621.572

Шевелёва А.М., аспирант
(ИТМ НАНУ и ГКАУ)**Тынына С.В.**, магистр
(ИГТМ НАН Украины)**МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПЛОСКОЙ
МОДЕЛИ ГАЗОВОГО ЭЖЕКТОРА С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ
ПОДВОДОМ МАССЫ****Шевельова Г.М.**, аспірант
(ІТМ НАНУ і ДКАУ)**Тинина С.В.**, магістр
(ІГТМ НАН України)**МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПЛОСКОЇ
МОДЕЛІ ГАЗОВОГО ЕЖЕКТОРА З ДОДАТКОВИМ
ПІДВЕДЕННЯМ МАСИ****Shevelyova A.M.**, Doctoral Student
(ITM NASU & SSAU)**Tynyna S.V.**, M.S. (Tech)
(IGTM NAS of Ukraine)**METHODS FOR EXPERIMENTAL STUDYING FLAT MODEL GAS
EJECTOR WITH AN ADDITIONAL SUPPLY OF WEIGHT**

Аннотация. Разработана методика экспериментальных исследований влияния основных геометрических и газодинамических параметров эжектора на характер течения внутри разгонного канала, оснащенного дополнительным подводом энергоносителя. Методика направлена на проведение экспериментальных исследований по установлению принципиальной возможности защиты стенок струйного эжектора за счет подвода дополнительного потока энергоносителя в смесительную камеру.

Представлена схема и описание лабораторной модели для исследования физических процессов, которые протекают в эжекторе, работающем в среде двухфазных газовых потоков.

Выбран и обоснован план многофакторного эксперимента, установлены параметры, подвергающиеся изменению и контролю при проведении исследований, а также уровни и интервалы варьирования исследуемых параметров.

Представлена схема обработки и анализа результатов экспериментальных исследований по изучению влияния основных геометрических и газодинамических параметров эжектора на эффективность протекания внутрикамерных процессов.

Предложенная методика позволяет разработать регрессионно-статистическую модель эжектора с дополнительным подводом энергоносителя, которая, в свою очередь, позволит разработать конструкцию данного эжектора с усовершенствованными геометрическими и газодинамическими параметрами.

Ключевые слова: многофакторный эксперимент, плоская модель, эжекторный узел, износ стенок разгонного канала, дополнительный подвод энергоносителя.

Для предотвращения воздействия двухфазного потока (газ – твердые частицы) на стенки разгонного канала эжекторного узла, приводящего к износу последних, необходимо проведение мероприятий по защите элементов конструкции.

Одним из способов защиты стенок разгонного канала является введение в канал дополнительного пристеночного потока газа-энергоносителя.

Оценка эффективности использования данного способа требует проведения экспериментальных исследований с целью установления параметров способа, обеспечивающих надежную защиту элементов конструкции от износа.

Целью данной работы является разработка методики экспериментальных исследований по изучению влияния основных геометрических и газодинамических параметров эжектора на характер течения с возможностью получения экспериментально-статистических данных для разработки математических моделей выходных параметров в заданном диапазоне исследований.

Методика направлена на проведение экспериментальных исследований по установлению принципиальной возможности защиты стенок разгонного канала струйного эжектора за счет подвода дополнительного (защитного) потока энергоносителя в смесительную камеру и включает в себя решение следующих задач:

- выбор параметров, которые будут изменяться в процессе исследований (факторов варьирования);
- разработку и изготовление лабораторной модели, допускающей активное влияние, для изучения процессов, протекающих внутри разгонного канала данной модели;
- выбор критериев оценки конечных результатов экспериментальных исследований;
- планирование многофакторного эксперимента, установление уровней и интервалов варьирования исследуемых параметров;
- определение коэффициентов регрессионной математической модели;
- установление характера воздействия геометрических и газодинамических параметров модели на эффективность протекания внутрекамерных процессов.

Выбор варьируемых факторов. Параметрами исследуемого процесса являются следующие [1-3]:

- скорость эжектирующего газа на выходе из сопла V_{z1} , м/с;
- скорость движения твердой фазы на выходе из сопла $V_{ч1}$, м/с;
- давление основного потока газа на входе в сопло P_{0o} , МПа;
- температура эжектирующего газа на входе в сопло T_{0o} , К;
- атмосферное давление P_a , МПа;
- плотность газа ρ_{z0} , кг/м³;
- газовая постоянная R , Дж/кг·К;
- диаметр твердых частиц $d_{ч}$, м;
- масса частиц твердой фазы $m_{ч}$, кг;
- площадь сопла эжектирующего газа f_c , м²;

- площадь сечения разгонной трубки F_{mp} , м²;
- длина разгонной трубки L_{mp} , м;
- давление дополнительного потока газа P_{don} , МПа;
- температура защитного потока газа T_{don} , К;
- расстояние между щелевыми отверстиями l , м;
- ширина щелевого отверстия h , м;
- количество щелевых отверстий n , шт.;
- угол подвода эжектирующего потока газа α , град;
- угол подвода дополнительного потока газа α_{don} , град.

Вследствие того, что исследовать влияние всех параметров невозможно, необходимо выбрать те из них, изучение влияния которых даст наиболее информативную картину процесса. К изменяемым факторам предъявляются следующие требования [4,5].

1. Факторы являются функционально и статистически независимыми.
2. Значение переменных должны устанавливаться по воле оператора.
3. Их значения должны быть однозначно определены. Точность их определения должна быть примерно на порядок больше, чем точность измерения отклика.
4. Факторы должны быть совместимы, т.е. не вызывать аварийных ситуаций в работе исследуемого устройства.

В качестве варьируемых факторов были приняты следующие: относительный перепад давлений эжектирующего газа P_{0o}/P_a ; относительный перепад давлений дополнительного потока газа P_{don}/P_{0o} ; относительная ширина щелевых отверстий h/l ; количество щелевых отверстий n , шт.; относительный угол подвода дополнительного потока газа α_{don}/α ; относительная площадь сечения разгонного канала F_{mp}/f_c (таблица 1).

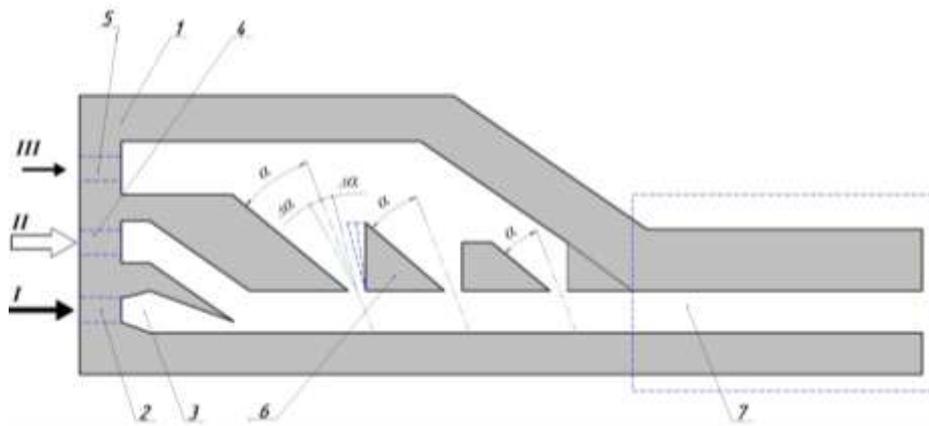
Таблица 1 – Исследуемые факторы и уровни варьирования

Исследуемые факторы	Обозначение	Уровень варьирования		
		-1	0	+1
P_{0o}/P_a	X_1	0,4	0,5	0,6
P_{don}/P_{0o}	X_2	0,8	0,9	1
h/l	X_3	0,08	0,09	0,1
n , шт.	X_4	1	2	3
α_{don}/α	X_5	1/2	2/3	5/6
F_{mp}/f_c	X_6	10	11,2	12,4

Описание лабораторной модели. Принципиальная схема лабораторной модели для исследования защиты стенок разгонного канала эжектора за счет подвода дополнительного периферийного потока энергоносителя представлена на рисунке 1 [6].

Конструкция представленной модели эжектора позволяет влиять на протекающие внутрикамерные процессы путем варьирования газодинамических и геометрических параметров: давления основного и дополнительного потоков

газа, ширины и количества щелевых отверстий, расстояния между щелевыми отверстиями, угла подвода защитного газового потока.



- 1 – корпус модели; 2 – канал подвода эжектирующего газа; 3 – сопло эжектирующего газа; 4 – канал подвода твердой фазы; 5 – канал подвода дополнительного потока газа; 6 – сменные элементы; 7 – разгонный канал;
 I – эжектирующий поток газа; II – эжектируемый поток; III – дополнительный поток газа;
 α – угол наклона подвода дополнительного потока; $\Delta\alpha$ – изменение угла подвода

Рисунок 1 – Схема плоской модели эжекторного узла

План эксперимента. В качестве основного рабочего плана может быть использован план полного многофакторного эксперимента с двухуровневым варьированием параметров, дополненный однофакторным планом со стабилизацией. Для исключения влияния на функцию отклика систематических ошибок, вызванных внешними условиями, предусмотренные матрицей планирования опыты следует проводить в случайной последовательности [7,8].

План-матрица однофакторного эксперимента с частичной стабилизацией факторов – в таблице 2, матрица планирования для проведения многофакторного эксперимента представлена в таблице 3.

Таблица 2 – План-матрица однофакторного эксперимента с частичной стабилизацией факторов

№ опыта	Фактор				
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅
1	+	0	0	0	0
2	-	0	0	0	0
3	0	+	0	0	0
4	0	-	0	0	0
5	0	0	+	0	0
6	0	0	-	0	0
7	0	0	0	+	0
8	0	0	0	-	0
9	0	0	0	0	+
10	0	0	0	0	-
11	0	0	0	0	0

Таблица 3 – Матрица планирования

№ опыта	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅
1	2	3	4	5	6
1	-1	-1	-1	-1	-1
2	+1	-1	-1	-1	-1
3	-1	+1	-1	-1	-1
4	+1	+1	-1	-1	-1
5	-1	-1	+1	-1	-1
6	+1	-1	+1	-1	-1
7	-1	+1	+1	-1	-1
8	+1	+1	+1	-1	-1
1	2	3	4	5	6
9	-1	-1	-1	+1	-1
10	+1	-1	-1	+1	-1
11	-1	+1	-1	+1	-1
12	+1	+1	-1	+1	-1
13	-1	-1	+1	+1	-1
14	+1	-1	+1	+1	-1
15	-1	+1	+1	+1	-1
16	+1	+1	+1	+1	-1
17	-1	-1	-1	-1	+1
18	+1	-1	-1	-1	+1
19	-1	+1	-1	-1	+1
20	+1	+1	-1	-1	+1
21	-1	-1	+1	-1	+1
22	+1	-1	+1	-1	+1
23	-1	+1	+1	-1	+1
24	+1	+1	+1	-1	+1
25	-1	-1	-1	+1	+1
26	+1	-1	-1	+1	+1
27	-1	+1	-1	+1	+1
28	+1	+1	-1	+1	+1
29	-1	-1	+1	+1	+1
30	+1	-1	+1	+1	+1
31	-1	+1	+1	+1	+1
32	+1	+1	+1	+1	+1

В качестве функции отклика на воздействия исследуемых факторов выбраны: скорость двухфазного потока, движущегося в разгонном канале, V_2 , м/с; расстояние от выходного сечения разгонного канала до места оседания твердых частиц на стенки $L_{эф}$, м, отвечающие ряду требований к параметрам функции отклика: универсальность, возможность представления одним членом и представления в количественном виде.

Обработка и анализ результатов исследования. Получаемая при обработке результатов эксперимента математическая модель является уравнением регрессии, которое имеет вид [9]:

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{i,j=1}^n a_{ij} x_i x_j ,$$

где y – исследуемые параметры; a_0 – свободный член уравнения; a_i, a_{ij} – коэффициенты при линейных параметрах и парном взаимодействии факторов соответственно; x_i, x_j – уровни варьирования факторов.

Оценка значимости каждого из коэффициентов производится по критерию Стьюдента, адекватность полученного уравнения регрессии проверяется с помощью критерия Фишера, а проверка однородности оценок проводится по критерию Кохрена [10].

При исследовании способа защиты стенок разгонной трубки модели от износа целесообразно представить полученные уравнения в натуральной форме. Переход к физическим переменным в уравнении регрессии осуществляется следующим образом

$$X_i = \frac{x_i - x_{i0}}{\Delta x_i} ,$$

где X_i – кодированное значение исследуемого фактора; x_i – натуральное (текущее) значение фактора; x_{i0} – натуральное значение нулевого фактора; Δx_i – интервал варьирования i -го параметра.

Значимость факторов определяется с помощью коэффициента эластичности, показывающего, на сколько процентов изменяется функция при изменении аргумента на единицу (на 1%).

$$\mathcal{E}_i = \frac{a_i x_{i0}}{a_0} ,$$

где x_{i0} – натуральное значение нулевого фактора; a_0, a_i – коэффициенты регрессии.

Коэффициент эластичности

$$\xi = \frac{\mathcal{E}_i}{\mathcal{E}_\Sigma} \cdot 100\% .$$

Выводы. В соответствии с поставленными задачами определена методика проведения экспериментальных исследований по изучению влияния основных геометрических и газодинамических параметров эжектора на характер течения внутри разгонного канала, оснащенного дополнительным подводом энергоносителя.

Представлено описание модели для установления характера воздействия геометрических и газодинамических параметров на эффективность способа защиты стенок разгонного канала от износа за счет дополнительного подвода энергоносителя.

Выбран и обоснован план многофакторного эксперимента, определены исследуемые факторы, уровни их варьирования.