

УДК 532.584.002.612:622.33

Семененко Е.В., д-р техн. наук, ст. науч. сотр.,
Демченко Т.Д., магистр
(ИГТМ НАН Украины)

**УЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ТВЕРДОЙ ФАЗЫ СТРУКТУРИРОВАННЫХ
СУСПЕНЗИЙ В ФОРМУЛАХ ОСВАЛЬДА-РЕЙНЕРА И
БИНГАМА-ШВЕДОВА**

Семененко Є.В. д-р техн. наук, ст. наук. співр.,
Демченко Т.Д. магістр
(ІГТМ НАН України)

**ВРАХУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ТВЕРДОЇ ФАЗИ СТРУКТУРОВАНИХ
СУСПЕНЗІЙ У ФОРМУЛАХ ОСВАЛЬДА-РЕЙНЕРА І
БИНГАМА-ШВЕДОВА**

Semenenko E.V., D. Sc. (Tech.), Senior Researcher,
Demchenko T.D. Sc. of Master
(IGTM NAS of Ukraine)

**PARAMETERS OF STRUCTURED SUSPENSION SOLID PHASE
TAKEN INTO ACCOUNT IN THE OSWALD-RAYNER AND
BINGAME-SHVEDOV FORMULAS**

Аннотация. Статья направлена на исследования влияния свойств твердой фазы реологической характеристики структурированной суспензии, а также на установление взаимозависимости параметров реологических законов Освальда-Рейнера и Бингама-Шведова. Для анализа были выбраны результаты исследований отечественных и зарубежных специалистов, которые указали на возможность применения реологических законов Освальда-Рейнера и Бингама-Шведова для описания реологических свойств структурированной суспензии в условиях геотехнологических систем. В статье проанализированы результаты экспериментальных исследований реологических характеристик структурированных суспензий из углей разных марок. Впервые установлена зависимость между константами реологического закона Освальда-Рейнера и реологическими характеристиками применяемыми в формуле Бингама-Шведова, а также получена зависимость эффективной вязкости и начального касательного напряжения угольных структурированных суспензий от выхода летучих веществ на зольную массу частиц твердой фракции.

Ключевые слова: структурированная суспензия, эффективная вязкость, реологическая характеристика, уголь.

Современные геотехнологические системы, а также технологии добычи и переработки углей, особенно техногенных месторождений, предполагают широкое использование структурированной суспензии (СС). Такой подход позволяет существенно снизить энергоемкость технологий и капитальные затраты на их модернизацию. При этом возможности снижения энергоемкости, а также обеспечение эффективности и надежности таких технологий существенно зависят от рационального выбора реологических характеристики (РХ) СС, ко-

торые, в свою очередь определяются свойствами твердой и жидкой фаз. Проблема рационального выбора РХ СС актуальна с точки зрения улучшения экологической ситуации в регионах с высокой концентрацией угольных предприятий, переработки существующих отходов углеобогащения, переоборудовании энергетических комплексов под сжигание водоугольного топлива [7].

Исследование зависимости РХ рассматриваемых СС занимались многие авторы [8]. Традиционно изучалась зависимость РХ от концентрации суспензии, а также от плотности и крупности частиц твердой фазы. Результаты этих исследований указывают на ряд особенностей в зависимости РХ СС, полученных на основе углей: высокие значения концентрации твердой фазы при незначительном диапазоне ее изменения (от 62 до 70 % по массе); зависимость РХ не от средневзвешенной крупности частиц, а от массовых долей характерных фракций; плотность углей не является постоянной величиной для конкретного месторождения и зависит нескольких факторов. Для описания РХ рассматриваемых СС большинство авторов предлагают использовать один из двух законов – Освальда-Рейнера или Бингама-Шведова. Однако рекомендации относительно того для каких условий какой закон нужно использовать отсутствуют.

Первоначально эти формулы рассматривались как альтернативные друг другу, однако принципиально различное поведение степенной и линейной функции затрудняло выбор закона при описании экспериментальных данных. Но в последние годы ряд исследователей предлагает совместное использование этих законов [6]. Этот подход предполагает использовать формулу Освальда-Рейнера на начальном участке реологической кривой до выхода на структурный режим, а затем, в области структурных режимов течения применять формулу Бингама-Шведова. Однако такой подход требует специальных условий согласования законов на границе начального и линейного участков реологической кривой, а также согласования параметров РХ от свойств частиц твердой фазы. Если вопрос согласования законов исследовался в работах отечественных ученых [1, 2, 6, 7], то по второму вопросу публикации неизвестны.

Цель статьи – анализ влияния свойств твердой фазы РХ СС, приготовленных на основе углей, а также установление взаимозависимости параметров реологических законов Освальда-Рейнера и Бингама-Шведова.

Для исследования зависимости РХ СС от свойств, твердой и жидкой фазы. Были выбраны результаты экспериментальных исследований [1 - 9], которые указывают на возможность использования для описания РХ рассматриваемых СС законов Освальда-Рейнера и Бингама-Шведова:

$$\tau = k\dot{\epsilon}^n, \quad (1)$$

$$\tau = \tau_0 + \eta\dot{\epsilon}, \quad (2)$$

где τ – касательное напряжение; $\dot{\epsilon}$ – скорость деформации; k – индекс консистенции в законе Освальда-Рейнера; n – индекс течения в законе Освальда-Рейнера; τ_0 – начальное касательное напряжение (НКН) в законе Бингама-

Шведова; η – эффективная вязкость (ВЭ) в законе Бингама-Шведова.

Результаты экспериментальных исследований НКН и ВЭ при течении СС на основе обогащенного антрацита и антрацитового штыба показывают существенную зависимость режима течения СС от массовой концентрации [1, 2, 6, 7]. При концентрации 65,7, 68,7 и 70,0 % суспензии на основе обогащенного антрацита проявляют признаки дилатантности, ньютоновского течения и псевдопластичности соответственно. Суспензии, приготовленные на основе антрацитовых шламов, начинают проявлять признаки, близкие к псевдопластикам, при концентрациях от 62 до 66 %.

Данные, полученные в исследованиях [1, 2, 6, 7], иллюстрируют снижение величины НКН при одинаковой скорости сдвига по мере повышения степени метаморфизма исходного продукта. Наименьшие касательные напряжения характерны для СС из углей марок Т, ПА и А, а максимальные – для суспензий на основе углей начальной стадии метаморфизма. Эту закономерность подтверждает также тенденция возрастания касательных напряжений с увеличением выхода летучих веществ, которая проявляется в большей степени при большей скорости сдвига. Так, например, при скорости сдвига $\dot{\epsilon} = 10 \text{ с}^{-1}$ и увеличении выхода летучих веществ с 6,5 % (антрацит) до 44,0 % (уголь марки Д) касательное напряжение сдвига увеличивается в 13,5 раз, а при скорости сдвига $\dot{\epsilon} = 120 \text{ с}^{-1}$ только в 3,34 раза. Согласно результатам этих же экспериментов зависимость эффективной вязкости СС от скорости сдвига и степени метаморфизма исходного угля в достаточной мере четко отображают режим течения в диапазоне индекса течения от 0,5 до 1,1. Статистическая обработка экспериментальных данных, на начальном участке реологической кривой до выхода на структурный режим с учётом структуры формулы Освальда-Рейнера дала возможность получить эмпирические зависимости касательных напряжений от скорости сдвига при течении СС, приготовленных на основе углей разных марок (рис. 1, табл. 1)[1].

Таблица 1 – Значение параметров формулы Освальда-Рейнера для углей различных марок [1, 2, 6, 7]

Марка угля	Значение k	Значение n	Марка угля	Значение k	Значение n
А	0,164	1,083	К	0,759	0,856
ПА	0,200	1,062	Ж	1,470	0,759
Т	0,245	1,014	Г	3,920	0,635
ОС	0,515	0,925	Д	6,060	0,566

Анализ приведенных зависимостей свидетельствует о том, что по мере увеличения выхода летучих веществ индекс консистенции k увеличивается от 0,164 до 6,6, а индекс нелинейности n уменьшается от 1,083 до 0,556 [1, 2, 6, 7]

$$n = 1,18 - 0,014V^{daf}. \quad (3)$$

Таким образом, обобщенная для всех марок углей зависимость касательного

напряжения от выхода летучих веществ выражается так [1, 2, 6, 7]:

$$\tau = 0,0609 \cdot 1,1^{V^{daf}} \dot{\epsilon}^{1,18-0,014V^{daf}} \quad (4)$$

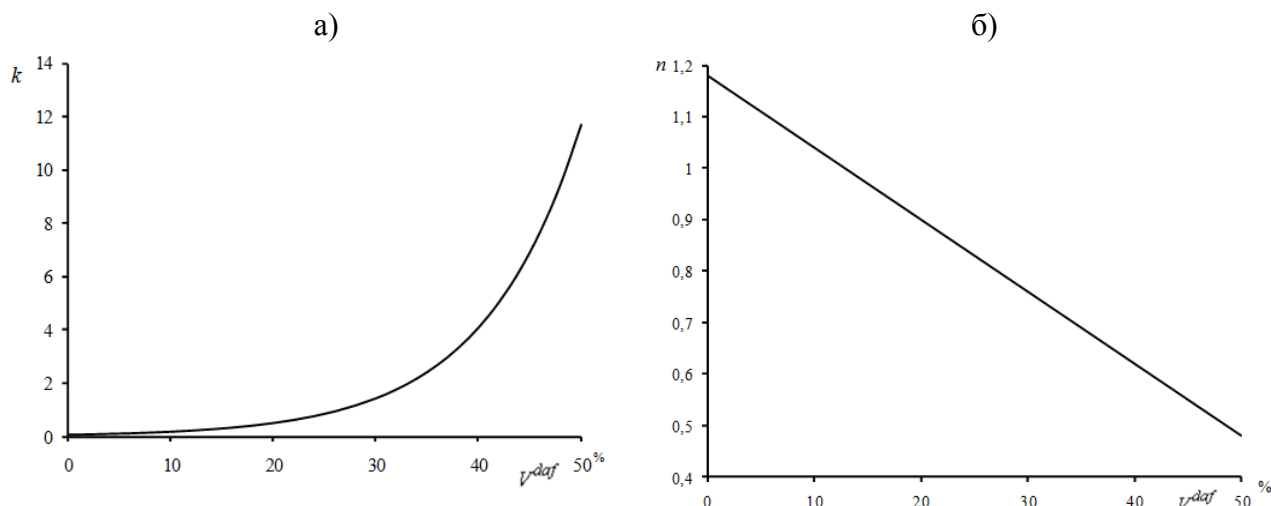


Рисунок 1 – Зависимость величин индексов консистенции (А) и течения (Б) от выхода летучих веществ из исходного угля

Результаты численной обработки данных (табл. 2 – 5 [8]), позволяют установить зависимость между величинами k и n и η и τ_0

$$k = A\eta^m, \quad (5)$$

$$n = B\tau_0^p, \quad (6)$$

где A , B – коэффициенты пропорциональности (табл. 6); m , p – показатели степени (табл. 6).

Таблица 2 – Характеристики СС на основе углей Канчо-Ачинского бассейна, измельченных в циклической мельнице [8]

C' , %	d_s , мм	η , Па·с	τ_0 , Па	k , Па·с ^{n}	n
50,0	0,065	0,67	19,73	10,4	0,48
56,0	0,081	2,64	42,90	27,8	0,49
55,8	0,082	1,68	48,50	24,3	0,49
49,6	0,134	0,22	7,10	3,1	0,52
49,6	0,317	0,24	8,77	5,6	0,39

Таблица 3 – Характеристики СС на основе углей Канчо-Ачинского бассейна, измельченных в цилебной мельнице [8]

C' , %	d_s , мм	η , Па·с	τ_0 , Па	k , Па·с ⁿ	n
53,80	0,056	0,58	14,22	9,58	0,43
48,80	0,040	0,50	5,63	4,48	0,51
49,60	0,052	0,32	3,82	1,99	0,63
50,25	0,049	0,39	4,23	2,06	0,66
51,00	0,104	0,30	5,60	2,71	0,55
52,40	0,141	0,42	6,08	2,92	0,60

Таблица 4 – Характеристики СС на основе углей Канчо-Ачинского бассейна различной зольности с добавкою пластификатора [8]

A^d , %	C' , %	Добавка, % на сухую массу угля	k , Па·с ⁿ	n	τ_0 , Па	η , Па·с
14,3	58,6	0,0	–	–	3,72	1,01
14,3	58,2	0,7	0,5	1,0	0,58	0,58
14,3	60,3	0,6	0,6	1,0	1,67	0,64
14,3	59,7	0,85	0,5	0,9	0,60	0,62
12,7	57,1	0,5	6,2	0,4	11,20	0,32
12,7	60,1	0,6	0,9	1,0	1,90	0,79
23,4	56,6	0,5	5,0	0,5	9,00	0,42
23,4	59,5	0,6	1,1	0,9	3,60	0,77

Таблица 5 – Характеристики СС на основе угля шахты «Инская» [8]

C' , %	A^d , %	d_s , мкм	k , Па·с ⁿ	n	τ_0 , Па	η , Па·с
58,4	17,1	74,65	3,27	0,46	3,55	0,55
60	14,7	74,31	4,08	0,47	4,56	0,67
61,5	15	97,03	2,93	0,57	2,73	0,72
62,2	15,7	65,71	3,81	0,47	4,2	0,63
62,8	18,7	83,35	5,87	0,52	6,44	1,16
63,1	16,7	80,95	6,28	0,47	6,6	1,12
65,8	11,8	76,00	2,18	0,651	2,34	0,67

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 РХ 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 ЛИТЕРАТУРЫ

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.] - Днепропетровск, 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. Svitliy, 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 suspensiy* [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, за-

ведующий отделом проблем шахтных энергетических комплексов, Институт геотехнической механики 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-Шведова, 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.

Статья поступила в редакцию 31.08.2015.

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