

УДК 532.584

doi 10.18101/978-5-9793-0803-6-156-162

**ИЗУЧЕНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И ПОДБОР
МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РЕОЛОГИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ
ВОДОУГОЛЬНОЙ СУСПЕНЗИИ
ПРИ ТРАНСПОРТИРОВКЕ И ХРАНЕНИИ**

© *Буянтуев Сергей Лубсанович*, доктор технических наук, профессор
Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления
Россия, г. Улан-Удэ
E-mail: buyantuevsl@mail.ru

© *Кондратенко Анатолий Сергеевич*, кандидат технических наук
Бурятского государственного университета
Россия, г. Улан-Удэ

© *Хмелев Андрей Борисович*, аспирант
Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления
Россия, г. Улан-Удэ

© *Чукреев Дмитрий Александрович*, студент
Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления
Россия, г. Улан-Удэ

© *Сандаков Иван Михайлович*, студент
Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления
Россия, г. Улан-Удэ

© *Благочинов Святослав Александрович*, студент
Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления
Россия, г. Улан-Удэ

Целью исследования является изучение изменений реологических свойств водоугольной суспензий (ВУС) и выбор математической модели реологического поведения материала, которая лучше всего описывает экспериментальные данные. Объектом исследования были образцы ВУС из бурого угля. ВУС проявляет реопексные свойства неньютоновских систем, о чем свидетельствует увеличение вязкости во времени от 0.018 до 0.027 Па*с. Определены тип жидкости, структура и механические свойства поведения ВУС при механическом воздействии. В статье представлены зависимости динамической вязкости ВУС от времени и скорости вращения шпинделя. Зависимости описывают с помощью теоретических моделей для систем, реологические свойства которых изменяются в процессе механического воздействия — моделей Бингама, Кэссона, степенного закона (Power Law), реологического поведения паст (Past) Хершель-Балклей. Проведенные исследования показали, что модель Кэссона,

свойственная пластическим дилатным телам и псевдопластикам, обеспечивает хорошую сходимость экспериментальных и расчетных данных.

Ключевые слова: водоугольная суспензия, электроразрядные методы, вязкость, реологическая модель.

STUDYING THE RHEOLOGICAL PROPERTIES AND THE SELECTION OF THE RHEOLOGICAL MODEL OF COAL-WATER SLURRY DURING TRANSPORT AND STORAGE

Sergey L. Buyantuev, Doctor of Engineering Sciences, Professor,
East Siberia State University of Technology and Management
Ulan-Ude, Russia

Anatoly S. Kondratenko, Candidate of Engineering Sciences,
Buryat State University
Ulan-Ude, Russia

Andrei B. Khmelev, Postgraduate student,
East Siberia State University of Technology and Management
Ulan-Ude, Russia

Dmitry A. Chukreev, Undergraduate Student,
East Siberia State University of Technology and Management
Ulan-Ude, Russia

Ivan M. Sandakov, Undergraduate Student,
East Siberia State University of Technology and Management
Ulan-Ude, Russia

Svyatoslav A. Blagoshinov, Student,
East Siberia State University of Technology and Management
Ulan-Ude, Russia

The aim of the research was to study the changes of the rheological properties of coal-water slurries (CWS) treated by the electric discharge methods and the selection of a mathematical model of the rheological behavior of CWS that describes the experimental data. The objects of the research were the samples of CWS of brown coal. CWS has rheopex properties of non-Newtonian systems, evidenced by an increase in viscosity over time from 0.018 to 0.027 Pa*s. The type of liquid, structural and mechanical properties, the behavior of the system under the influence of mechanical action have been defined. The article presents the dependence of the dynamic viscosity of the IGC on the time and the speed of rotation of the spindle. Dependences are described by means of theoretical models for the systems, rheological properties of which are changed in the process of mechanical action — Bingham model, Casson, a power law (Power Law), the rheological behavior of pastes (Past), Herschel-Bulkley. Research has shown that the Casson model peculiar to plastic and pseudoplastic bodies and provides good convergence of experimental and calculated data.

Keywords: coal-water slurry, electric discharge methods, viscosity, rheological model.

Введение. Анализ мировых ресурсов невозобновляемых видов топлива показал, что наиболее перспективным для использования в энергетике является уголь, потому что его резервы на Земле во много раз превосходят запасы нефти и газа. Тем не менее экологические проблемы, возникающие при использовании угольного топлива, требуют разработки и внедрения новых экологически и экономически эффективных угольных технологий.

Для этого необходимо улучшить потребительские свойства угля и освоить получение на его основе альтернативного топлива при замене дефицитных природных ресурсов: газообразного и жидкого нефтяного топлива.

В связи с этим является актуальным использование угля в виде суспензионного водоугольного топлива, или водоугольных суспензий (ВУС) [1].

Постановка задачи. ВУС должна обладать всеми технологическими свойствами жидкого топлива (транспортировка в авто- и железнодорожных цистернах, по трубопроводам, в танкерах и наливных судах, хранение в закрытых резервуарах) и сохранять свои свойства при длительном хранении и транспортировании, при этом вязкость и реологическая модель поведения являются важными техническими характеристиками ВУС [2].

Методы исследований. Решение поставленной задачи основывается на использовании электроразрядных методов для подготовки ВУС без использования пластификаторов. Порядок проведения экспериментов и полученные данные элементного анализа частиц угля ВУС до и после обработки рассмотрены ранее [3].

В статье показаны данные исследований динамической вязкости ВУС, тип жидкости и реологическая модель.

Экспериментальная часть. Для проведения исследований ВУС использовали ротационный вискозиметр «BrookfieldRVDV-II+ Pro» (ЦКП «Прогресс»). Измерение динамической вязкости образцов проводилось при комнатной температуре.

Для измерения динамической вязкости образцов в диапазоне от 0,003 до 2 Па*с при комнатной температуре использовался шпиндель ULA, скорость вращения шпинделя составляла 50 об/мин. С целью установления типа жидкости проводилось изучение изменения динамической вязкости ВУС во времени. Исследования показали, что ВУС относится к неньютоновским реопексным жидкостям, так как их вязкость увеличивается во времени при постоянной скорости вращения и для поддержания постоянной скорости течения необходимо постепенное повышение скорости сдвига.

Водные растворы мелкодисперсного угля проявляют реопексные свойства неньютоновских систем, о чем свидетельствует увеличение вязкости во времени от 0.018 до 0.027 Па*с. Известно [4], что реопексные системы структурируются, образуя контакты между частицами в результате ориентации при механическом воздействии с небольшими градиентами скорости. Полученная зависимость объясняется физическими свойствами агрегатов угля к структурообразованию, а также пористостью и способностью поглощать воду, что

приводит к увеличению динамической вязкости системы при приложении нагрузки (рис. 1).

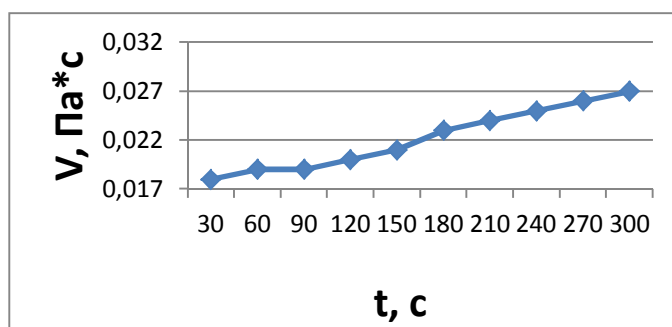


Рис. 1. Динамическая вязкость ВУС по времени

Изучение изменения динамической вязкости ВУС от скорости вращения шпинделя проводится для изучения поведения системы под действием механического воздействия (табл. 1).

Таблица 1
Зависимость вязкости от скорости вращения шпинделя

Вязкость, Па*с	Скорость, об/мин	Процент закручивания пружины, %	Напряжение сдвига, Н/м ²	Скорость сдвига 1/с	Температура, °С	Интервал времени, с
0,0271	50	21,2	16,59	61,15	30,57	60
0,0268	51	21,4	16,75	62,37	30,62	30
0,0267	52	21,7	16,98	63,59	30,57	50
0,0265	53	22,0	17,21	64,81	30,30	15
0,0264	54	22,3	17,45	66,04	30,25	10
0,0262	55	22,6	17,68	67,26	30,40	10
0,0261	56	22,9	17,92	68,48	30,42	10
0,0261	57	23,3	18,23	69,71	30,45	10
0,0261	58	23,7	18,55	70,93	30,60	10
0,0264	57	23,6	18,47	69,71	30,35	10
0,0268	56	23,5	18,39	68,48	30,65	10
0,0272	55	23,4	18,31	67,26	30,32	10
0,0276	54	23,3	18,23	66,04	30,30	10
0,0282	53	23,4	18,31	64,81	30,42	15
0,0289	52	23,5	18,39	63,59	30,25	20
0,0302	51	24,1	18,86	62,37	30,32	30
0,0322	50	25,2	19,72	61,15	30,32	60

Вязкость образца во все случаях повысилась, о чем свидетельствуют значения динамической вязкости: 0.0271 Па*с при 50 об/мин, в промежуточной

точке при 58 об/мин вязкость составляла 0,0261 Па*с и в конце исследования 50 об/мин — 0,032 Па*с.

Зависимость «вязкость-скорость» (рис. 2) отражает показатель разрушения системы, и может ли она восстанавливать свои свойства после механического воздействия шпинделя. На представленном рисунке «вязкость-скорость» видно, что системы не только не разрушаются при вращении шпинделя, а, наоборот, при увеличении скорости вращения пробы загустевают.

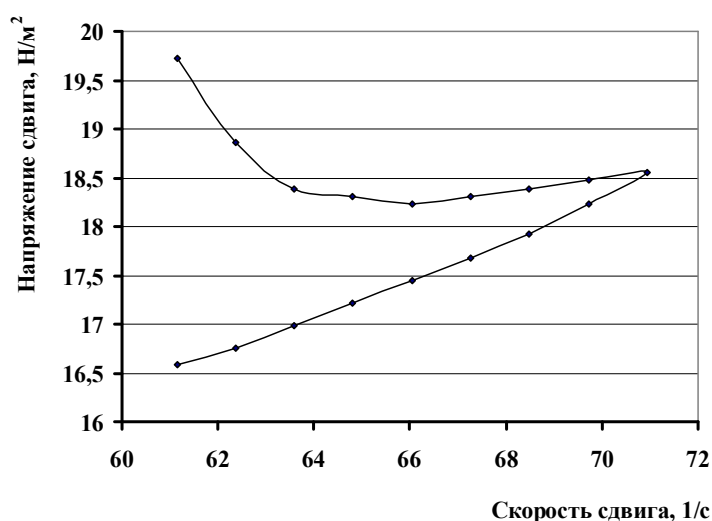


Рис. 2. Зависимость напряжения сдвига от скорости сдвига ВУС

При образовании петель «гистерезиса» (рис. 2) зависимости описывают с помощью теоретических моделей для систем, реологические свойства которых изменяются в процессе механического воздействия — моделей Бингама, Кэссона, степенного закона (Power Law), реологического поведения паст (Past), Хершель-Балклей. Выбор модели осуществляется по коэффициенту сходимости, который должен максимально приближаться к 100 % (CoF=100) [6].

Используя экспериментальные данные (табл. 1), была построена кривая реологического поведения исследуемых водных растворов нанодисперсного угля по модели Кэссона (рис. 3), математическое выражение которой представлено уравнением (1):

$$\tau^{1/2} = \tau_0^{1/2} + (\eta D)^{1/2}, \quad (1)$$

где τ — напряжение сдвига, Дин/см² или Н/м²; τ_0 — сдвиговая прочность (сдвигающее напряжение), Дин/см² или Н/м²; η — пластическая вязкость, сПз или мПа·с; D — скорость сдвига, с⁻¹.

На рисунке 3 изображены три кривые: 1 — зависимость квадратного корня напряжения сдвига (SQRTShearStress) от квадратного корня скорости сдвига

(SQTRShearRate) при ее постепенном увеличении; 2 — приведенная программой вискозиметра *Reocalc* прямолинейная зависимость модели Кэссона, построенная на основании кривых (1, 3). Для данной модели предельное напряжение (*YieldStress*) определяют как длину отрезка, отсекаемого прямой на оси напряжения сдвига, возведенную в квадрат ($11,6 \text{ Н/м}^2$); 3 — зависимость квадратного корня напряжения сдвига (SQTRShearStress) от квадратного корня скорости сдвига (SQTRShearRate) при ее постепенном снижении.

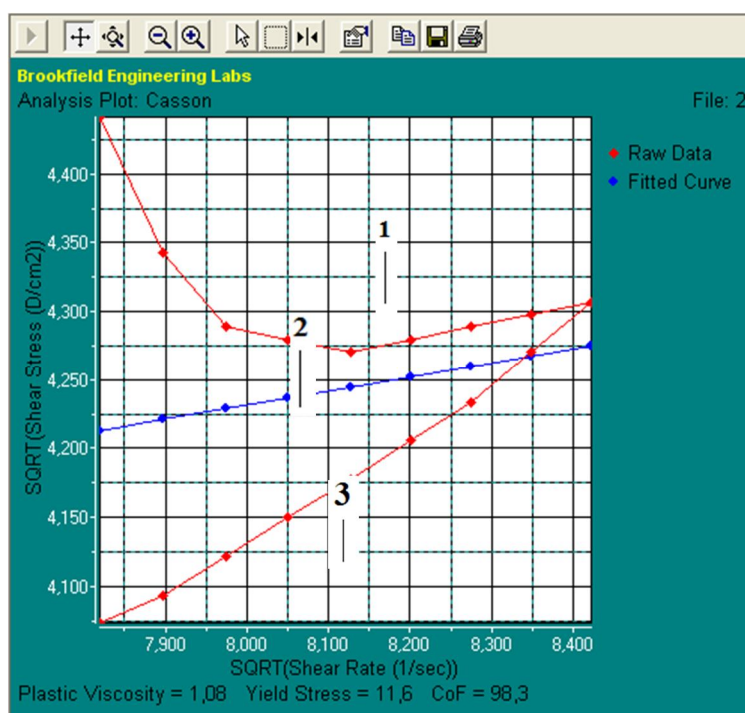


Рис. 3. Расчеты по модели Кэссона

Проведенные исследования показали, что модель Кэссона, свойственная пластическим дилатным телам и псевдопластикам, обеспечивает хорошую сходимость экспериментальных и расчетных данных, что подтверждается высоким коэффициентом сходимости (98,3 %). ВУС является пластическим телом с коэффициентом пластичности (*Plastic Viscosity*), равным 1,08.

Заключение

ВУС являются сложным реологическим объектом, так как состоят из дисперсионной среды (вода) и дисперсионной фазы — частиц угля, распределенных в воде и связанных с ней физическими силами. Химического взаимодействия с водой не происходит, так как агрегаты угля являются инертными. Поэтому характер течения систем будет зависеть от соотношения дисперси-

онной среды и дисперсной фазы, размеров частиц, силы взаимодействия между частицами.

Структурно-механические свойства исследуемых систем под напряжением сдвига, равным $11,06 \text{ Н/м}^2$, характеризуются пластичностью, о чем свидетельствует коэффициент пластичности, соответствующий 1,08. Это позволяет говорить о том, что под действием нагрузки водные растворы нанодисперсного угля способны деформироваться при умеренных усилиях и сохранять форму, то есть проявлять остаточную деформацию при кратковременном действии умеренной по величине импульсной силы. При этом в системах происходит потеря энергии вследствие движения агрегатов и отдельных частиц.

Некоторые авторы [5] считают, что коэффициент пластичности по Кэссону связан с течением отдельных частиц в условиях полного разрушения агрегатов. В данном случае пластичность будет определяться соотношением дисперсионной среды, твердой фазы и размера частиц. Вероятно, что увеличение радиуса частиц и их численной концентрации приведет к увеличению пластичности систем.

Согласно П. А. Ребиндеру и Н. В. Михайлову, исследуемые системы являются твердообразными, то есть обладающими статическим и динамическим предельным напряжением сдвига.

Таким образом, описываемые объекты относятся к пластичным материалам, то есть способны под действием внешних сил необратимо деформироваться без нарушения сплошности. Моделирование деформационного поведения нанодисперсного угля позволит теоретически обосновать и скорректировать технологические режимы его обработки.

Литература

1. Senchurova J., Murko V., Fedyaev V., Dziuba D., Pusirev E. Results of spray nozzles rotor coal-water fuel // The Tomsk Polytechnic University news. 2008. P. 37–40.
2. Zhuravlev N., Murko V., Fedyaev V., Dziuba D., Senchurova Y., Zaoztrovsky A. Environmental aspects of the vortex combustion technology of coal slurry fuel // Ecology and Industry of Russia. 2009. P. 6–9
3. Buyantuev S., Kondratenko A., Khmelev A. Analysis of characteristics of coal-water slurries obtained by plasma and electric discharge methods // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2014. Vol. 9, № 11. P. 2102–2105.
4. Пирогов А. Н., доня Д. В. Инженерная реология. Кемерово, 2004. 110 с.
5. Физический смысл реологических коэффициентов в обобщенной модели Кэссона / Е. А. Кирсанов, С. В. Ремизов, Н. В. Новоселова, В. Н. Матвеев // Вестник Московского государственного университета. Сер. 2. Химия. 2007. С. 22–26.
6. Крупеникова В. Е., Раднаева В. Д., Танганов Б. Б. Определение динамической вязкости на ротационном вискозиметре BrookfieldRVDV-II+Pro. Methodical instructions Ulan-Ude, ESSUTM, 48 pp. 2011.