

УДК 67.02/67.08

Д.А. Капустин /к.т.н./

ГОУ ВО ЛНР «Луганский государственный педагогический университет» (Луганск)

А.В. Кущенко /к.т.н./

ГОУ ВО ЛНР «Луганский государственный университет имени Владимира Даля» (Луганск)

РЕЗУЛЬТАТЫ ПЛАНИРОВАННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ РЕОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫСОКОКОНЦЕНТРИРОВАННОЙ ВОДОУГОЛЬНОЙ СУСПЕНЗИИ

Выполнен регрессионный анализ результатов реологических исследований высококонцентрированных водоугольных суспензий с помощью современных средств обработки данных. Представлены зависимости напряжения сдвига и эффективной вязкости от скорости сдвига, концентрации твердой фазы, зольности исходного угля, выхода летучих веществ и гранулометрического состава (критерия бимодальности).

Ключевые слова: водоугольная суспензия, анализ, регрессионная зависимость, напряжение сдвига, вязкость, реологические характеристики, фактор влияния.

Постановка проблемы

Актуальность темы исследования обусловлена необходимостью разработки технических и технологических решений, обеспечивающих высокоэффективное и экологически безопасное использования топлива в виде водоугольной суспензии (ВУС) в теплоэнергетических установках, а также расширением применения ВУС в других аппаратах различного назначения, использующих в настоящее время более дорогие виды топлива (газ, мазут и др.).

Согласно энергетической стратегии России основную часть электроэнергии по-прежнему планируется получать на тепловых электростанциях [1], что характерно и для Донбасса. При ожидаемом снижении добычи нефти и газа важным становится вопрос их частичной замены на водоугольное топливо. При этом в Федеральном законе «Об энергосбережении» уделяется внимание разработке и использованию альтернативных видов топлив, в том числе ВУС, что особенно актуально для ДНР и ЛНР.

Особенно насущна проблема повышения потребительских свойств и утилизация отходов обогащения каменных углей и антрацитов, переработка которых традиционными способами вызывает ряд проблем, связанных, в частности, с высокой зольностью и влажностью, а также необходимостью обезвоживания, что при существующих подходах экономически не целесообразно.

Тем не менее, анализ литературных источников показывает перспективность применения водоугольной суспензии в качестве топлива с использованием отходов угледобычи, углепереработки и других производств [1...4].

Серьезным препятствием на пути широкого

применения водоугольной суспензии в качестве топлива является сложность управления реологическими параметрами на этапах ее производства, транспортировки и сжигания. В технологиях, применяемых в настоящее время [3...5], эти задачи решаются различными способами: подбором гранулометрического состава, зольности, концентрации твердой фазы, режима течения, пластификаторов и т. п.

В этой связи актуальным представляется исследование реологии ВУС и определение зависимостей для расчета напряжения сдвига и вязкости от скорости сдвига, концентрации твердой фазы, гранулометрического состава (критерий бимодальности), зольности исходного угля и выхода летучих веществ, что позволит повысить точность вычисления основных параметров течения такой среды.

Анализ последних исследований и публикаций

Анализ предметной области позволил установить, что существует ряд независимых направлений исследований свойств водоугольных суспензий и топлива. Среди них следует выделить работы, направленные на изучение и оптимизацию как свойств исходного материала (угля), его содержания в суспензии, так и режимов течения по трубопроводу [2,6].

Кроме того, следует обратить внимание на исследования, направленные на получение заданных свойств ВУС путем использования химических добавок [3].

В работах [1,3,7,8] представлены рекомендации по рациональной скорости течения ВУС в каналах круглого сечения, которые соответствуют скорости сдвига 20 с^{-1} . При этом постоянство

скорости сдвига сохраняется для всех диаметров трубопроводов. В работах [2,3,5] также отмечено, что зачастую наблюдается искривление линейной зависимости напряжения от скорости сдвига $\dot{\gamma}$ при ее величине менее $9...16 \text{ с}^{-1}$. Однако в дальнейших расчетах данный факт игнорируется, что приводит к значительному увеличению погрешности определения реологических показателей при малых скоростях сдвига.

Во всех изученных научных работах учитывается влияние концентрации твердого компонента C на свойства водоугольной суспензии, а предельным рекомендованным значением является массовое содержание в 70 %. В работе [2] произведена оценка реальной массовой концентрации с учетом пористости угля, полученные результаты на $1...3\%$ (в зависимости от типа угля) превышают значения, рассчитанные по классической методике, в связи с чем, предельным значением содержания твердой фазы для обеспечения текучести среды следует считать 67 %.

В работах [2,4,8] произведены исследования по оптимизации гранулометрического состава водоугольных сред, из которых следует, что текучесть и стабильность ВУС напрямую зависит от соотношения крупной и мелкой фракций угля, в связи с чем основным показателем качества дисперсного состава (при заданном среднем диаметре частиц) является критерий бимодальности Γ , который определяется как отношение содержания тонкодисперсной и грубодисперсной части рассева (относительно промежуточной фракции).

Зольность исходного топлива (угля) является одним из важнейших показателей при расчете реологических свойств водоугольной суспензии. Ее увеличение приводит к резкому возрастанию напряжения сдвига и вязкости среды [4]. Наряду с этим исследования данного свойства носят разрозненный характер, неполными являются данные для высокозольных углей и отходов обогащения. С точки зрения экономической целесообразности и возможности поддержания окислительных реакций предельным значением зольности следует считать величину в 35 %.

Выход летучих веществ является характерным показателем каждого типа угля и редко учитывается при исследовании реологических свойств, в то время как последние испытывают значительное влияние со стороны этого параметра. Его использование в качестве фактора влияния позволит, в первую очередь, перевести качественный показатель – тип угля в количественный, и учесть при расчете напряжения сдвига и вязкости. Максимальное его значение соответствует газовым углям и достигает 45 %, минимальное – антрацитам и колеблется в районе 5 %

[3,5].

Таким образом, необходимы исследования реологических свойств высококонцентрированных водоугольных суспензий и определения комплексных зависимостей напряжения сдвига и вязкости ВУС от скорости сдвига, концентрации твердой фазы, критерия бимодальности и основных свойств угля.

Цель (задачи) исследования

Целью исследования является определение зависимостей напряжения сдвига и эффективной вязкости ВУС от скорости сдвига, концентрации твердой фазы, гранулометрического состава (критерий бимодальности), зольности исходного угля и выхода летучих веществ путем обработки результатов планируемых реологических экспериментов.

Основной материал исследования

На начальном этапе работы проведены исследования по определению геометрической формы зависимостей напряжения сдвига и эффективной вязкости. Полученные результаты (для угля марки Г) приведены на рис. 1 и 2.

Из анализа зависимостей величины касательных напряжений и показателя вязкости, следует что для диапазона изменения скорости сдвига от начального значения до 9 с^{-1} характерна существенно криволинейная форма кривых (отклонение от линейной характеристики составляет порядка 20...50 %). В связи с этим авторами предложено разделение регрессионных зависимостей на два диапазона по скорости сдвига от $1,8$ до 9 с^{-1} и от 9 до $48,6 \text{ с}^{-1}$ с определением автономных аналитических выражений.

Исходя из результатов предварительного анализа, в том числе учитывая наличие участка существенной кривизны в области определения уравнений регрессии для дальнейших испытаний авторами спланирован и реализован 3-х уровневый пятифакторный эксперимент. При этом учитывалось также, что осуществление эксперимента с числом факторов более 5-ти при количестве уровней более 3-х приводит к значительному увеличению как объемов, так и продолжительности экспериментов, а также что выполнение такого исследования было бы технически гораздо более сложным.

Диапазоны изменений и интервалы варьирования скорости сдвига $\dot{\gamma}$, концентрации твердой фазы C , критерия бимодальности Γ , зольности исходного угля A^d и выхода летучих веществ V^T принимали следующие значения (табл. 1).

Для обработки результатов экспериментов использовано приложение Statistica (ее

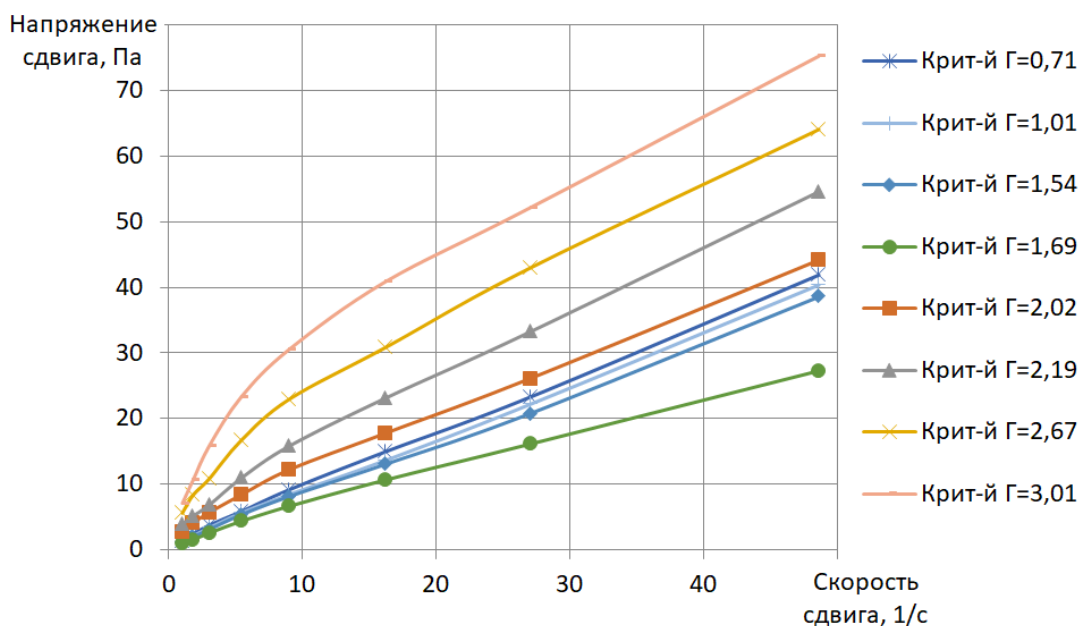


Рис. 1. Зависимость напряжения от скорости сдвига при концентрации твердой фазы $C=64,5\%$; зольности $A^d=25,2\%$; выходе летучих веществ $V^I=45\%$

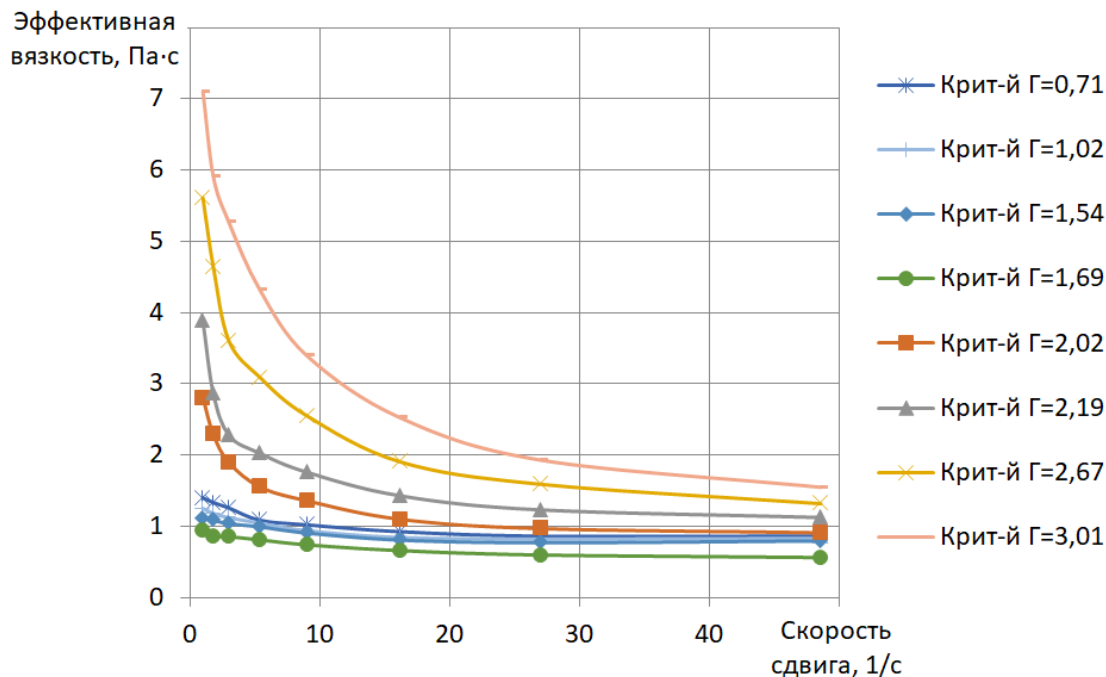


Рис. 2. Зависимость эффективной вязкости от скорости сдвига при концентрации твердой фазы $C=64,5\%$; зольности $A^d=25,2\%$; выходе летучих веществ $V^I=45\%$

бесплатная версия). В программе использованы инструменты промышленного эксперимента DOE для экспериментов с тремя уровнями варьирования факторов (рис. 3) [9].

Выбраны трехуровневые планы для 5-ти независимых факторов. В качестве матриц планирования использованы матрицы Бокса-Бенкена, матрицы дробного и полнофакторного экспериментов. Произведено заполнение матриц планирования значениями функции отклика, согласно уровней варьирования аргументов.

Также произведен расчет коэффициентов

регрессии, произведена оценка их значимости и дисперсия, с помощью соответствующих инструментов программного продукта (рис. 4).

После получения итогового вида уравнений регрессии произведена сравнительная оценка точности расчета напряжения сдвига и эффективной вязкости для различных значений и уровней варьирования факторов рис. 5 и 6 для участка 1 и 2 соответственно (табл. 2, 3).

Анализ представленных на рис. 5 и 6 кривых, а также табл. 2 показал, что хотя дробные факторные эксперименты показывают более точные

Табл. 1. Значения диапазонов изменений и интервалов варьирования факторов влияния

Факторы влияния (независимые параметры)	Факторы				
	Скорость сдвига $\dot{\gamma}$, 1/с	Концентрация С, %	Зольность A^d , %	Выход летучих веществ V^{Γ} , %	Критерий бимодальности Г
1-й участок					
Нулевой уровень	5,4	64,5	25	25	2
Интервал варьирования	3,6	2,5	10	20	1
Верхний уровень	9	67	35	45	3
Нижний уровень	1,8	62	15	5	1
2-й участок					
Нулевой уровень	28,8	64,5	25	25	2
Интервал варьирования	19,8	2,5	10	20	1
Верхний уровень	48,6	67	35	45	3
Нижний уровень	9	62	15	5	1

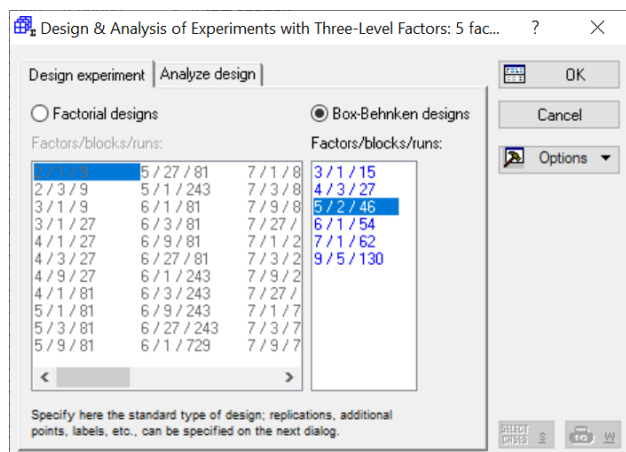


Рис. 3. Окно выбора типа матрицы планирования эксперимента

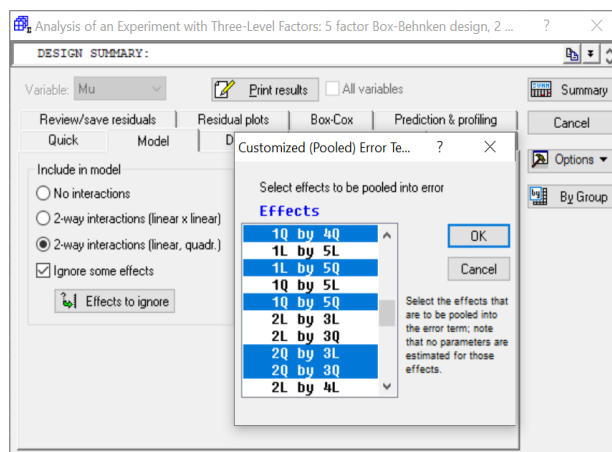


Рис. 4. Исключение из матрицы планирования малозначимых сочетаний факторов

Табл. 2. Значения напряжения сдвига и величина относительного отклонения

№ п/п	Величина напряжения сдвига τ , Па				Относительное отклонение, %		
	Бокс-Бенкен	Дробн. факторн. план	Полн. факторн. План.	Эксперимент	Бокс-Бенкен	Дробн. факторн. план	Полн. факторн. План.
1-й участок							
1	2,3	4,08	5,05	4,55	97,83	11,52	9,90
2	8,7	7,79	8,9	8,70	0,00	11,68	2,25
3	13,43	11,1	11,66	11,96	10,98	7,71	2,53
2-й участок							
1	30,44	30,66	30	28,27	7,14	7,81	5,78
2	39,1	42,05	46,5	50,04	27,97	18,99	7,61
3	47,47	53,43	63,4	67,69179	42,60	26,69	6,77

значения для точек, представленных в матрицах планирования (план Бокса-Бенкена), в иных случаях точность расчета в значительной степени снижается.

В первую очередь это касается участка 1 и обусловлено сложной формой зависимости напряжения сдвига и эффективной вязкости от скорости сдвига, концентрации твердой фазы,

зольности исходного угля, выхода летучих веществ и критерия бимодальности.

Табл. 3. Значения эффективной вязкости и величина относительного отклонения

№ п/п	Величина эффективной вязкости μ , Па·с				Относительное отклонение, %		
	Бокс-Бенкен	Дробн. факторн. план	Полн. факторн. План.	Эксперимент	Бокс-Бенкен	Дробн. факторн. план	Полн. факторн. План.
1-й участок							
1	3,29	2,95	2,73	2,53	23,17	14,31	7,41
2	1,61	1,64	1,69	1,61	0,07	1,76	4,67
3	1,09	1,55	1,45	1,33	21,87	14,30	8,39
2-й участок							
1	1,63	1,42	1,27	1,33	18,50	6,45	4,60
2	1,06	1,04	0,99	0,94	11,16	9,45	4,88
3	0,86	0,95	0,88	0,79	7,58	16,34	9,68

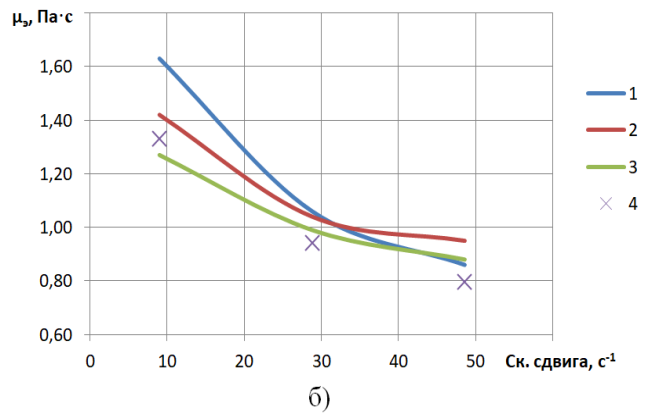
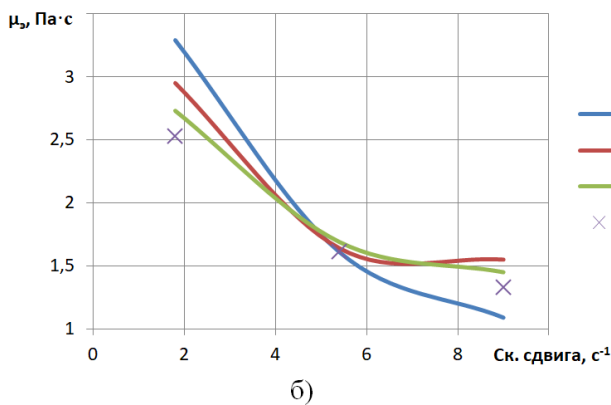
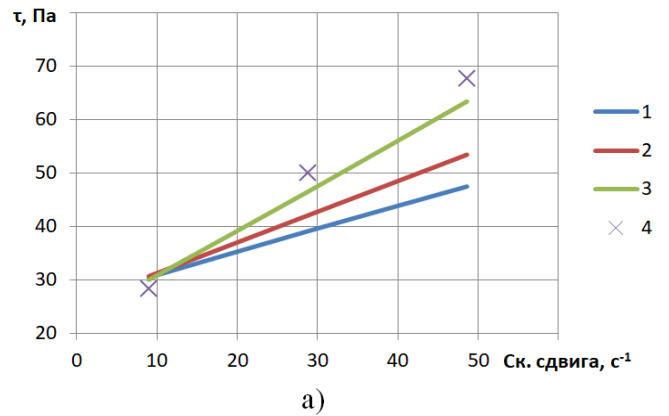
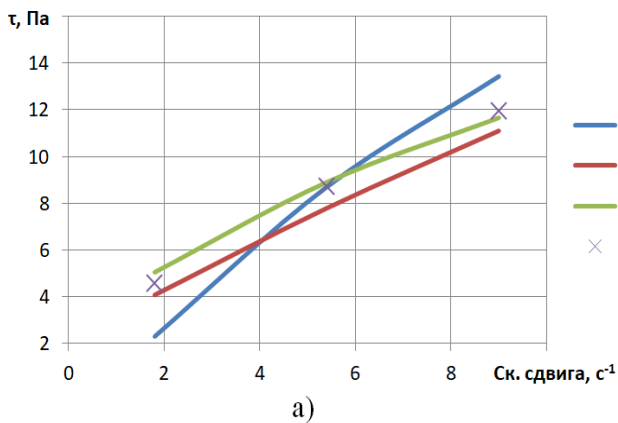


Рис. 5. Зависимости напряжения и эффективной вязкости от скорости сдвига для 1 участка (концентрация $C=64,5\%$, зольность $A^d=25\%$, выход летучих $V^r=25\%$, критерий бимодальности $\Gamma=2$)

1 – регрессионная зависимость плана Бокса-Бенкена; 2 – регрессионная зависимость дробного факторного плана; 3 – регрессионная зависимость полного факторного плана; 4 – экспериментальные данные

Рис. 6. Зависимости напряжения и эффективной вязкости от скорости сдвига для 2 участка (концентрация $C=64,5\%$, зольность $A^d=25\%$, выход летучих $V^r=25\%$, критерий бимодальности $\Gamma=2$)

1 – регрессионная зависимость плана Бокса-Бенкена; 2 – регрессионная зависимость дробного факторного плана; 3 – регрессионная зависимость полного факторного плана; 4 – экспериментальные данные

В результате уравнения регрессии в кодированных параметрах для участка 1 представлены выражениями 1 и 2 для напряжения сдвига и эффективной вязкости соответственно.

$$\begin{aligned}
 y(\tau) = & 9,71 + 3,08x_1 - 0,83x_1^2 + 5,67x_2 + \\
 & + 1,28x_2^2 + 0,74x_3 + 0,87x_4 - 2,65x_4^2 + \\
 & + 6,68x_5 + 4,95x_5^2 + 3,95x_1x_2 + 2,12x_1x_2^2 - \\
 & - 0,78x_1^2x_2 + 1,99x_1x_3 + 0,5x_1x_3^2 + \\
 & + 1,56x_1x_4 + 2,7x_1x_5 + 2,08x_1x_5^2 - \\
 & - 0,76x_1^2x_5 - 0,55x_1^2x_5^2 + 3,25x_2x_3 - \\
 & + 1,11x_2x_3^2 + 2,32x_2^2x_3 + 0,8x_2^2x_3^2 + \\
 & + 4,25x_2x_4 + 2,31x_2x_4^2 + 3,89x_2^2x_4 + \\
 & + 3,73x_2^2x_4^2 + 6,89x_2x_5 + 4,81x_2x_5^2 + \\
 & + 3,84x_2^2x_5 + 2,53x_2^2x_5^2 + 0,43x_3x_4 + \\
 & + 1,48x_3x_4^2 - 0,53x_3^2x_4 + 0,58x_3^2x_4^2 + \\
 & + 2,78x_3x_5 + 1,86x_3x_5^2 + 0,62x_3^2x_5 + \\
 & + 0,49x_3^2x_5^2 + 4,29x_4x_5 + 3,16x_4x_5^2 + \\
 & + 0,62x_4^2x_5
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned}
 y(\mu_v) = & 1,612 - 0,205x_1 + 0,078x_1^2 + \\
 & + 0,846x_2 + 0,067x_2^2 + 0,051x_3 - \\
 & - 0,056x_4 - 0,643x_4^2 + 0,982x_5 + \\
 & + 0,816x_5^2 - 0,992x_1x_2 - 0,592x_1x_2^2 + \\
 & + 0,518x_1^2x_2 + 0,318x_1^2x_2^2 - 0,312x_1x_3 - \\
 & - 0,098x_1x_3^2 + 0,138x_1^2x_3 - 0,617x_1x_4 + \\
 & + 0,351x_1^2x_4 - 1,174x_1x_5 - 0,732x_1x_5^2 + \\
 & + 0,642x_1^2x_5 + 0,387x_1^2x_5^2 + 0,715x_2x_3 + \\
 & + 0,247x_2x_3^2 + 0,508x_2^2x_3 + 0,168x_2^2x_3^2 + \\
 & + 1,007x_2x_4 + 0,396x_2x_4^2 + 0,901x_2^2x_4 + \\
 & + 0,876x_2^2x_4^2 + 1,735x_2x_5 + 1,186x_2x_5^2 + \\
 & + 0,973x_2^2x_5 + 0,594x_2^2x_5^2 + 0,139x_3x_4 + \\
 & - 0,308x_3x_4^2 - 0,114x_3^2x_4 + 0,13x_3^2x_4^2 + \\
 & + 0,659x_3x_5 + 0,432x_3x_5^2 + 0,159x_3^2x_5 + \\
 & + 0,116x_3^2x_5^2 + 1,118x_4x_5 + 0,809x_4x_5^2 + \\
 & + 0,192x_4^2x_5
 \end{aligned} \tag{2}$$

Следует отметить, что величина достоверности аппроксимации для полученных уравнений регрессии составила $R^2=0,988$ и $R^2=0,978$ соответственно для зависимости 1 и 2. Это свидетельствует об адекватности описания характера поведения напряжения и эффективной вязкости в

зависимости от приведенных факторов влияния для указанного диапазона варьирования.

Для участка 2 квадратики в кодированных параметрах представлены уравнениями 3 и 4.

$$\begin{aligned}
 y(\tau) = & 27,06 + 9,48x_1 + 9,68x_2 + \\
 & + 1,49x_2^2 + 2,98x_3 + 0,54x_3^2 + 2,56x_4 - \\
 & - 4,55x_4^2 + 11,46x_5 + 8,06x_5^2 + 11,45x_1x_2 + \\
 & + 6,56x_1x_2^2 + 0,98x_1^2x_2 + 0,62x_1^2x_2^2 + \\
 & + 6,17x_1x_3 + 2,4x_1x_3^2 + 0,5x_1^2x_3 + \\
 & + 6,23x_1x_4 + 3,23x_1x_4^2 + 0,7x_1^2x_4 + \\
 & + 1,03x_1^2x_4^2 + 4,75x_1x_5 + 3,91x_1x_5^2 - \\
 & - 0,64x_1^2x_5 + 8,23x_2x_3 + 3,58x_2x_3^2 + \\
 & + 6,78x_2^2x_3 + 3,92x_2^2x_3^2 + 10,65x_2x_4 + \\
 & + 11,23x_2x_4^2 + 10,88x_2^2x_4 + 10,03x_2^2x_4^2 + \\
 & + 10,64x_2x_5 + 7,86x_2x_5^2 + 5,77x_2^2x_5 + \\
 & + 4,62x_2^2x_5^2 + 0,86x_3x_4 + 3,03x_3x_4^2 - \\
 & - 1,25x_3^2x_4 + 5,04x_3x_5 + 3,78x_3x_5^2 + \\
 & + 1,17x_3^2x_5 + 1,04x_3^2x_5^2 + 5,5x_4x_5 + \\
 & + 4,84x_4x_5^2 + 1,95x_4^2x_5
 \end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned}
 y(\mu_v) = & 0,986 - 0,179x_1 + 0,109x_1^2 + \\
 & + 0,253x_2 - 0,023x_2^2 + 0,031x_3 - \\
 & - 0,167x_4^2 + 0,333x_5 + 0,256x_5^2 - \\
 & - 0,413x_1x_2 - 0,226x_1x_2^2 + 0,318x_1^2x_2 + \\
 & + 0,18x_1^2x_2^2 - 0,161x_1x_3 - 0,028x_1x_3^2 + \\
 & + 0,128x_1^2x_3 + 0,042x_1^2x_3^2 - 0,174x_1x_4 + \\
 & + 0,041x_1x_4^2 + 0,144x_1^2x_4 - 0,445x_1x_5 - \\
 & - 0,304x_1x_5^2 + 0,284x_1^2x_5 + 0,208x_1^2x_5^2 + \\
 & + 0,342x_2x_3 + 0,135x_2x_3^2 + 0,27x_2^2x_3 + \\
 & + 0,135x_2^2x_3^2 + 0,432x_2x_4 + 0,401x_2x_4^2 + \\
 & + 0,427x_2^2x_4 + 0,398x_2^2x_4^2 + 0,516x_2x_5 + \\
 & + 0,377x_2x_5^2 + 0,284x_2^2x_5 + 0,219x_2^2x_5^2 + \\
 & + 0,144x_3x_4^2 - 0,052x_3^2x_4 + 0,235x_3x_5 + \\
 & + 0,168x_3x_5^2 + 0,051x_3^2x_5 + 0,044x_3^2x_5^2 + \\
 & + 0,287x_4x_5 + 0,234x_4x_5^2 + 0,07x_4^2x_5
 \end{aligned} \tag{4}$$

Величина достоверности аппроксимации для полученного уравнения регрессии составила $R^2=0,981$ и $R^2=0,976$. Это свидетельствует об адекватности описания характера поведения эффективной вязкости в зависимости от приведенных факторов влияния для указанного диапазона

варьирования.

Вывод

В ходе проведенных исследований установлено, что для адекватного описания реологического поведения высококонцентрированных водоугольных дисперсных сред наиболее целесообразным является разделение кривой напряжения сдвига, а с ней и эффективной вязкости на 2 участка: криволинейный (зона пластической деформации) – область последовательного разрушения (по мере увеличения скорости сдвига) структуры среды, и прямолинейный – участок с разрушенной структурой квазипостоянным значением показателя структурной вязкости.

Опыты показали, что для описания зависимостей напряжения сдвига и эффективной вязкости от значительного числа факторов (скорость сдвига, концентрация твердого компонента, зольность исходного угля, выход летучих веществ, критерий бимодальности) целесообразно использовать матрицы полнофакторного эксперимента, которые позволяют повысить точность расчета на всем диапазоне измерений (предельное отклонение от экспериментальных точек не более 10 %).

Список литературы

1. Радзюк А.Ю. Методы и средства подготовки водоугольной суспензии для теплотехнологических установок: дис. кандидата техн. наук/ Радзюк Александр Юрьевич. – Красноярск, 2005. - 128 с.
2. Баранов И.О. Повышение эффективности транспортировки высококонцентрированного водоугольного топлива в гидротранспортных системах промышленных предприятий: дис.

кандидата техн. наук/ Баранов Игорь Олегович. – Днепропетровск, 2019. - 217 с.

3. Баранова М.П. Физико-химические основы получения топливных водоугольных суспензий: монография / М.П. Баранова, В.А. Кулагин. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2011. – 160 с.
4. Бойко Е.Е. Разработка методических основ сжигания тонкодисперсных водоугольных суспензий при плазменном сопровождении в котлоагрегатах ТЭС: дис.... кандидата техн. наук/ Бойко Екатерина Евгеньевна. - Новосибирск, 2018. – 162 с.
5. Овчинников Ю. В. Технология получения и исследования тонкодисперсных водоугольных суспензий: монография/ Ю.Б. Овчинников, Е.Е. Бойко. – Новосибирск: НГТУ, 2017. - 308 с.
6. Pan F. Full process control strategy of fuel based on water-coal ratio of ultra supercritical units/ F. Pan, Y. Zhu, X. Zhang // International Conference on Electronics, Communications and Control (ICECC). - 2011. - P. 3750-3753.
7. Perkins R. P. Coal slurry development program / R.P. Perkins, R.K. Man-fred // Chem.Eng.progr. – 1995. – N. 5. - P. 69-76.
8. Pulido J. E. Rheology of colombian coal-water slurry fuels: Effect of particle-size distribution / J.E. Pulido, C.P. Rojas, G. Acero // Coal Science, Amsterdam. – 2005. – P. 1585-1588.
9. Халафян А.А. Промышленная статистика: контроль качества, анализ процессов, планирование экспериментов в пакете STATISTICA: учебное пособие/ А.А. Халафян. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2013. – 384 с.

D.A. Kapustin / Dr. Sci. (Eng.)/

Lugansk State Pedagogical University (Lugansk)

A.V. Kushchenko /Cand. Sci. (Eng.)/

Lugansk State University named after Vladimir Dal (Lugansk)

RESULTS OF A PLANNED EXPERIMENT TO DETERMINE THE RHEOLOGICAL CHARACTERISTICS OF A HIGHLY CONCENTRATED WATER-COAL SUSPENSION

Background. *The relevance of the study of the rheological characteristics of a highly concentrated water-angle suspension (WCS) is due to the need to develop technical and technological solutions that ensure its highly efficient and environmentally safe use as a fuel. The analysis of the subject area made it possible to establish that there are a number of independent areas of research on the properties of water-angle suspensions and fuels. Among them should be highlighted works aimed at studying and optimizing both the properties of the starting material (coal), its content in suspension, and the flow modes through the pipeline. The purpose of the study is to determine the dependence of the shear stress and the effective viscosity of the WCS on the shear rate, the concentration of the solid phase, the particle size distribution (bimodality criterion), the ash content of the original coal and the yield of volatile substances by processing the results of planned rheological experiments.*

Materials and/or methods. *From the analysis of the dependencies of the value of tangent stresses and the viscosity index, it follows that the range of change in the shear rate from the initial value to 9 s^{-1} is*

characterized by a significantly curved form of dependencies (the deviation from the linear characteristic is about 20-50%). In this connection, the regression equations were divided into two ranges by shear rate with the definition of autonomous expressions. The «Statistica» application (its free version) was used to process the results of the experiments. The program used the tools of the DOE industrial experiment with three levels of factor variation.

Results. A comparative analysis of the accuracy of determining the response function was carried out based on Box-Behnken planning matrices, fractional and full-factor experiments. It has been found that although fractional factor experiments show more accurate values for points presented in planning matrices, in other cases the accuracy of the calculation is significantly reduced. First of all, this concerns the first section and is due to the complex shape of the dependence of shear stress and effective viscosity on influence factors.

Conclusion. In the course of the studies, it was found that in order to adequately describe the rheological behavior of highly concentrated water-angle dispersed media, it is most expedient to divide the shear stress curve, and with it the effective viscosity, into 2 sections: curved and rectilinear. To describe the dependence of shear stress and effective viscosity on a significant number of factors (shear rate, concentration of the solid component, ash content of the initial coal, yield of volatile substances, bimodality criterion), it is advisable to use matrices of a full-factor experiment that make it possible to increase the calculation accuracy over the entire measurement range.

Keywords: water-coal suspension, analysis, regression dependence, shear stress, viscosity, rheological characteristics, influence factor.

Сведения об авторах

Д.А. Капустин

SPIN-код: 2350-9390

Author ID: 945762

Телефон: +380 (72) 139-12-68

Эл. почта: Kap-kapchik@mail.ru

А.В. Кущенко

Телефон: +380 (72) 200-30-33

Эл. почта: akm48848@gmail.com

Статья поступила 06.12.2021 г.
 © Д.А. Капустин, А.В. Кущенко, 2021
 Рецензент к.т.н., доц. И.Г. Дедовец

ИНФОРМАЦИОННЫЙ ПРОЕКТ

ВИБРАЦИЯ МАШИН: ИЗМЕРЕНИЕ, СНИЖЕНИЕ, ЗАЩИТА




vibro.donntu.org