

УДК 62-634.8:67.02:67.08

**ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВОДОРОДНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ
НА РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВОДОУГОЛЬНЫХ СРЕД****Капустин Д.А.***ГОУ ВО ЛНР «Луганский государственный педагогический университет», Луганск,
e-mail: kap-kapchik@mail.ru*

Статья посвящена исследованию закономерностей изменения реологических характеристик водоугольных суспензий (ВУС) при различных значениях температуры и водородного показателя жидкой фазы. Для определения степени изменения реологии относительно базовых температурных значений и величин кислотности введены соответствующие коэффициенты. Установлено, что зависимость реологических характеристик водоугольных сред от температурных показателей имеет сложный характер, наблюдается их снижение до 5 раз при нагреве до 20 °С, в дальнейшем темпы падения вязкости снижаются и составляют порядка 30–35%. Кроме того, произведены исследования по определению величины касательного напряжения и эффективной вязкости для водоугольных сред с различным содержанием твердого компонента. С ростом концентрации угля в суспензии наблюдается более резкое возрастание вязкостных характеристик при ее охлаждении до 3 °С. Даны рекомендации по организации трубопроводной системы для ВУС с учетом поддержания заданного температурного режима для промышленных площадок и вне их пределов. Проведенные исследования по определению влияния показателя pH на значения напряжения сдвига и эффективной вязкости дисперсных сред позволили установить, что с ростом водородного показателя среды с 4 до 12 наблюдается снижение реологических характеристик в 2,5 раза. При этом влияния на данный процесс содержания угольных частиц выявлено не было. Следует отметить, что одним из способов получения водоугольных суспензий с заданными вязкостными характеристиками является изменение pH водной составляющей.

Ключевые слова: касательное напряжение, эффективная вязкость, коэффициент, температура, водородный показатель, зависимость

**INFLUENCE OF TEMPERATURE AND HYDROGEN RATE
ON RHEOLOGICAL PROPERTIES OF WATER-COAL MEDIUM****Kapustin D.A.***Lugansk State Pedagogical University, Lugansk, e-mail: kap-kapchik@mail.ru*

The article is devoted to the study of the regularities of changes in the rheological characteristics of water-coal suspensions (WCS) at various temperatures and pH values of the liquid phase. To determine the degree of change in rheology relative to the basic temperature values and acidity values, the corresponding coefficients are introduced. It has been established that the dependence of the rheological characteristics of water-coal mediums on temperature indicators is complex, their decrease is observed up to 5 times when heated to 20 °C, further the rate of viscosity decrease decreases and amounts to about 30–35%. In addition, studies have been carried out to determine the magnitude of shear stress and effective viscosity for water-coal mediums with different contents of the solid component. With an increase in the concentration of coal in the suspension, a sharper increase in the viscosity characteristics is observed when it is cooled to 3 °C. Recommendations are given on the organization of the pipeline system for the WCS, taking into account the maintenance of the specified temperature regime for industrial sites and outside them. The studies carried out to determine the effect of the pH index on the values of the shear stress and effective viscosity of dispersed media made it possible to establish that with an increase in the pH of the medium from 4 to 12, a decrease in rheological characteristics by 2.5 times is observed. At the same time, the influence of the content of coal particles on this process was not revealed. It should be noted that one of the ways to obtain water-coal suspensions with desired viscosity characteristics is to change the pH of the water component.

Keywords: shear stress, effective viscosity, coefficient, temperature, pH value, dependence

Для успешного решения проблемы внедрения водоугольного топлива (ВУТ) в целом необходимо решение ряда частных задач.

При этом необходимо отметить, что в области технологии приготовления водоугольного топлива, несмотря на сложность самого процесса (выбор и подготовка угля заданного гранулометрического состава, подбор и четкое дозирование компонентов ВУТ, выбор условий и режимов работы основного и вспомогательного оборудования и т.д.) имеются существенные разработки и достижения как в практике научных исследований, так и внедрении полученных результатов. В настоящее время разработан ряд технологий

и технических решений, таких как «Reocarb», «Fluidcarbort», «Co-Al» и др. [1, 2].

По имеющейся информации, в области использования водоугольного топлива (непосредственного сжигания) в котлах различного назначения также решен ряд теоретических и практических задач, а именно: разработаны и изготовлены различные типы горелочных устройств, проведены их испытания, оценены параметры сжигания водоугольного топлива.

Таким образом, технические и технологические задачи по технологии приготовления и использования ВУТ, хоть и решены неокончательно, но степень их завершен-

ности все же в достаточной мере позволяет осуществить практическую реализацию таких процессов, о чем свидетельствует и мировой опыт.

Однако для комплексного решения проблемы и реализации идей создания топливно-энергетических комплексов различного назначения в ЛНР необходимо детальная отработка процесса перемещения ВУТ (водоугольной суспензии (ВУС)) в рамках технологических процессов.

Одним из видов транспортировки водоугольной суспензии является гидравлический трубопроводный транспорт.

Однако вопросам изучения процессов гидротранспортирования высококонцентрированного водоугольного топлива, как сложной многокомпозиционной системы, в рамках технологических процессов до настоящего времени не уделялось должного внимания.

Имеющиеся данные в большинстве своем относятся к транспортированию водоугольных сред на основе углей кузбасских месторождений, в зарубежной информации приводятся только результаты отдельных реологических исследований [3].

Между тем качественные характеристики угля месторождений Донбасса, оказывающие существенное влияние на свойства ВУТ, значительно отличаются от углей Кузбасса и естественно углей зарубежных месторождений.

Возникает необходимость оценки возможных реологических параметров ВУС в различных климатических условиях (при различной температуре) и с учетом кислотности водной составляющей.

Цель исследования – провести исследование реологических параметров водоугольной суспензии в зависимости

от ее температуры и водородного показателя жидкой фазы.

Материалы и методы исследования

Основным фактором внешнего воздействия на водоугольные среды является температура. Рассматривать это влияние в положительном или отрицательном аспекте необходимо с учетом технологии приготовления, транспортирования, хранения и применения ВУС. Терминалы приготовления находятся, как правило, в закрытых помещениях, и если они даже не отапливаются, то отрицательных температур там не бывает [1, 3, 4]. Тем не менее известно, что вязкость воды с изменением температуры от 0 до 20 °С уменьшается в 1,8 раза.

Научными сотрудниками НПО «Хаймек» (г. Донецк) проведены исследования реологических характеристик ВУТ на ротационном вискозиметре при изменении температуры в интервале (3÷50,0 °С). Массовая концентрация твердой фазы в суспензии, приготовленной на основе угля различных марок и характеристик, составила 65%. В качестве пластифицирующих химических добавок использовались «Дофен» и «НФУ» с расходом 1% на сухую массу угля.

Для оценки степени изменения эффективной вязкости среды в диапазоне температур, характерных для процесса перемещения по трубам такого рода континуумов, введен коэффициент [1]:

$$K_{\mu} = \mu_{\text{эл}} / \mu_{\text{э20}},$$

где $\mu_{\text{эл}}$ – эффективная вязкость при данной температуре; $\mu_{\text{э20}}$ – эффективная вязкость при температуре 20 °С.

Кроме того, произведена аппроксимация экспериментальных данных степенной зависимостью (рис. 1).

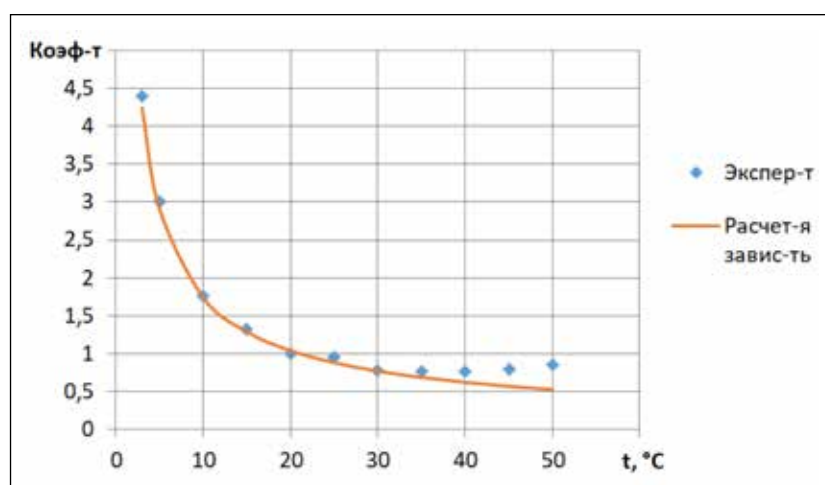


Рис. 1. Зависимость коэффициента изменения эффективной вязкости от температуры

Из анализа представленных на рисунке 1 зависимостей следует: значительное (в 4,5 раза) изменение реологических характеристик ВУС наблюдается в диапазоне температур от 3 до 20 °С; при этом в диапазоне от 20 до 50 °С максимальное отклонение не превышает 25%. Также следует отметить, что аппроксимационная зависимость для расчета коэффициента K_{μ} , предложенная в работе [1], имеет значительное отклонение при температуре более 35 °С.

Исследованиям влияния температурного режима на величину вязкости и напряжения сдвига для водоугольных суспензий уделено недостаточно внимания, а результаты носят разрозненный характер [5, 6]. Кроме того, отсутствуют данные о влиянии концентрации твердой фазы на изменение реологических характеристик ВУС при изменении ее температуры.

Влиянию кислотности жидкой фазы на реологические свойства водоугольных сред посвящен большой объем исследований [1, 4], при этом установлено, что с возрастанием водородного показателя наблюдается снижение величины напряжения сдвига [2, 3]. Однако данные о степени снижения касательных напряжений и эффективной вязкости суспензии разнятся.

В работе [1] в ходе исследований влияния водородного показателя диспергиру-

ющей среды на структурно-реологические характеристики ВУТ, использовалась водопроводная вода г. Донецка и техническая вода Ясиновского коксохимзавода (ЯКХЗ). Исследователями установлено, что эффективная вязкость ВУТ при использовании воды различного состава меняется слабо.

В работах [3, 4] авторы, наоборот, отмечают значительное (до 5 раз) снижение реологических показателей с ростом значения рН.

Результаты исследования и их обсуждение

Для определения зависимости величины касательного напряжения и эффективной вязкости от температуры проведен ряд опытов с водоугольной суспензией на основе угля марки Г для концентраций твердого компонента C , равных 62; 64,5 и 67% в диапазоне температур t от 3 до 50 °С при значении водородного показателя рН = 7. Значения реологических параметров определены при скорости сдвига $\gamma = 9 \text{ с}^{-1}$ на ротационном вискозиметре. В качестве пластификатора использовался лигносульфонат (ЛСТ). На основании экспериментальных значений напряжения сдвига и эффективной вязкости рассчитаны значения коэффициента K_{μ} (табл. 1) и построены соответствующие зависимости (рис. 3).

Таблица 1

Значения коэффициента K_{μ} для различных температур t и концентраций C

№ п/п	Концентрация тв. комп. C , %	Температура t , °С								
		3	5	10	15	20	25	30	40	50
1	62	1,83	1,67	1,34	1,21	1,00	0,99	0,95	0,85	0,82
2	64,5	3,23	2,86	2,12	1,67	1,00	0,94	0,88	0,78	0,71
3	67	4,78	4,18	3,20	2,31	1,00	0,91	0,86	0,73	0,64

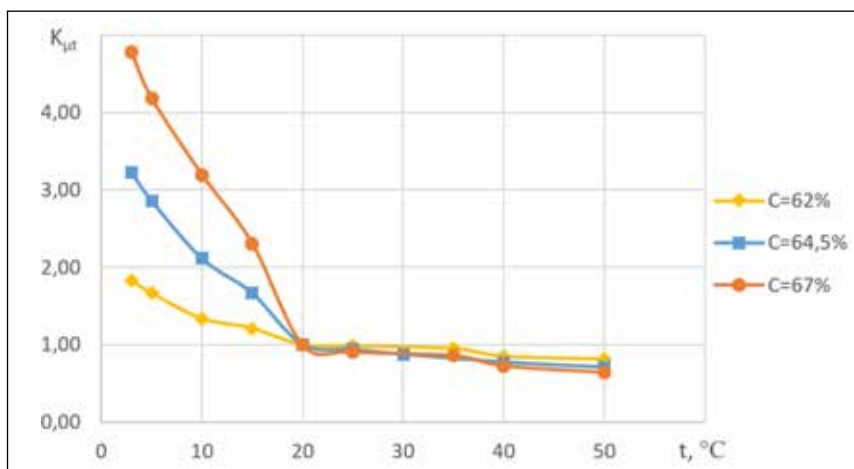


Рис. 2. Зависимость коэффициента K_{μ} от температуры t

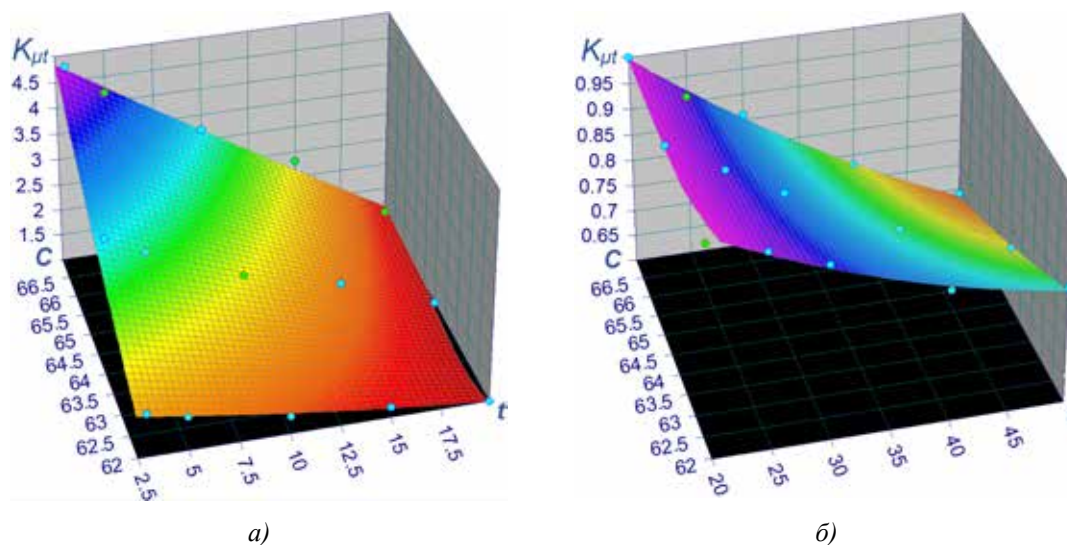


Рис. 3. Аппроксимация зависимостей коэффициента K_{μ} от температуры t и концентрации C :
а) температура от 3 до 20°C; б) температура от 20 до 50°C

Анализ кривых, приведенных на рис. 2, позволил установить, что характер зависимости коэффициента K_{μ} от температуры носит сложный характер. Наблюдается его изменение при значении равном 1 для всех концентраций угля.

Следует отметить, что в диапазоне температур от 3 до 20°C наблюдается резкое падение вязкостных характеристик ВУС (до 5 раз в зависимости от концентрации твердой фазы). При этом степень изменения вязкости стремится к 1,8 с увеличением доли жидкой фазы в ВУТ, что обусловлено степенью изменения вязкости воды.

В диапазоне температур от 20 до 50°C наблюдается снижение темпов изменения реологических характеристик для ВУС всех концентраций (максимальное падение не превышает 35%).

Для получения эмпирической зависимости коэффициента K_{μ} (вязкостных характеристик) произведена аппроксимация экспериментальных данных отдельно для участков до и более 20°C (рис. 3, а и б).

Аппроксимационные выражения принимают следующий вид:

от 3 до 20°C:

$$K_{\mu} = 8,30 + 2,00t - 0,84C + 0,0007t^2 + 0,012C^2 - 0,033tC,$$

от 20 до 50°C:

$$K_{\mu} = 6,04 + 0,054t - 0,17C + 0,00012t^2 + 0,0014C^2 - 0,0011tC$$

где t – температура ВУС, °C; C – концентрация твердой фазы, %.

Для внутрицеховых и промышленных гидросистем прокладку трубопроводов в пределах промплощадок следует производить над землей: на опорах или в каналах со свободным доступом. На открытых участках необходимо обеспечить подогрев (прокладка паровых спутников) либо теплоизоляцию. За пределами промышленных площадок трубопроводы для ВУС следует располагать под землей, при условии обеспечения температуры в верхней части трубопровода не ниже +1°C (в зимний период).

В случае длительных остановок в зимнее время рекомендуется обеспечить слив водоугольной суспензии из трубопроводной системы для предотвращения аварийных ситуаций при последующем пуске.

Экспериментальные исследования по определению зависимости реологических характеристик от значения водородного показателя рН проведены для тех же концентраций твердого материала при $\gamma = 9 \text{ с}^{-1}$ и температуре 20°C. Диапазон изменения кислотности водной фазы рН составил от 4 до 12.

Для оценки степени изменения касательного напряжения и эффективной вязкости среды в диапазоне изменения рН введен коэффициент $K_{\mu\text{pH}}$, который определяется как

$$K_{\mu\text{pH}} = \tau_{\text{ipH}} / \tau_{\text{opH}} = \mu_{\text{ipH}} / \mu_{\text{opH}},$$

где τ_{ipH} , μ_{ipH} – текущее значение касательного напряжения, эффективной вязкости; τ_{opH} , μ_{opH} – значение касательного напряжения, эффективной вязкости при рН = 7.

Таблица 2

Значения коэффициента K_{pH} при различных pH

№ п/п	Водородный показатель pH								
	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1,83	1,67	1,34	1,21	1,00	0,99	0,95	0,85	0,82

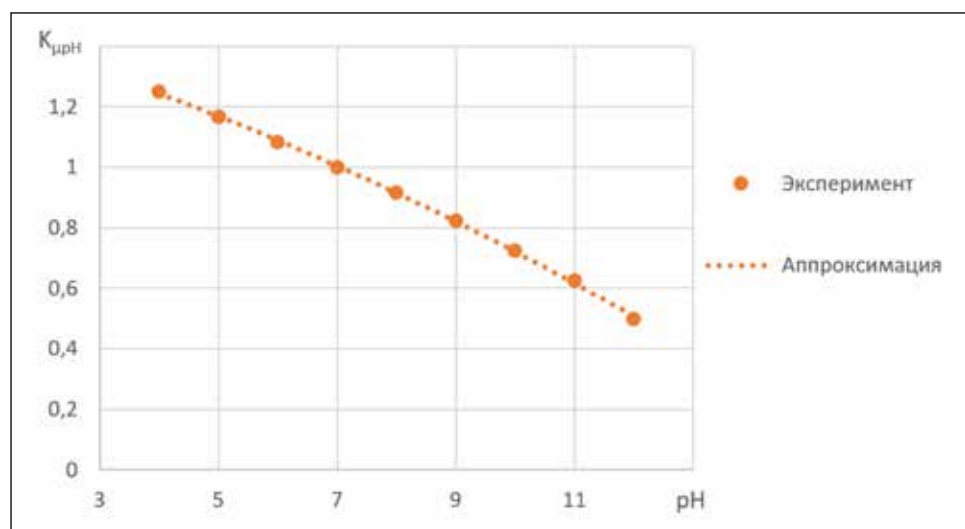


Рис. 4. Зависимость коэффициента K_{pH} от значения водородного показателя pH

Следует отметить, что значения K_{pH} для различных концентраций твердого компонента C совпадают.

Результаты исследований приведены в табл. 2 и на рис. 4.

В ходе анализа приведенной на рис. 4 кривой установлено, что наблюдается монотонное снижение величины K_{pH} с ростом кислотности среды. Зависимость носит близкий к линейному характер и незначительным искривлением при значениях pH выше 8. При этом наблюдается значительное снижение реологических характеристик с ростом водородного показателя от 1,25 при pH = 4 до 0,5 при pH = 12.

С целью повышения точности аппроксимация произведена нелинейной функцией ($R^2 = 0,995$) и имеет вид

$$K_{pH} = (2,17 - 0,31(\ln pH)^2)^{0,5}.$$

Кислотность среды является одним из значимых факторов, влияющих на значения реологических показателей ВУС. При этом одним из путей получения ВУТ с заданными вязкостными характеристиками является изменение водородного показателя жидкой фазы.

При этом следует ограничить степень увеличения pH, так как чрезмерное увели-

чение щелочности среды может привести к преждевременному выходу из строя котельного оборудования.

Выводы

1. В ходе анализа результатов проведенных исследований по определению зависимости реологических характеристик ВУС от температуры установлено, что происходит резкое снижение (до 5 раз) вязкости среды при повышении температуры от 3 до 20 °С. Дальнейшее повышение температуры от 20 до 50 °С также приводит к падению реологических свойств, однако оно составляет порядка 30–35%.

2. Произведена оценка влияния содержания твердой фазы на степень изменения вязкостных характеристик и установлено, что наблюдается значительное влияние концентрации угля в ВУС для интервала температур от 3 до 20 °С, с ее ростом от 62 до 67% коэффициент K_{μ} возрастает с 1,83 до 4,78. При нагреве суспензии свыше 20 °С влияние содержания угольных частиц нивелируется.

3. Даны рекомендации по организации трубопроводной системы перемещения ВУС с учетом поддержания заданного температурного режима для промышленных площадок и за их пределами.

4. Зависимость коэффициента $K_{\text{ир}}^{\text{уд}}$ (касательного напряжения, эффективной вязкости) от величины водородного показателя носит слабовыраженный нелинейный характер, и с ростом значения рН наблюдается его значительное снижение (до 2,5 раз).

5. Одним из направлений получения заданных реологических характеристик ВУС является изменение кислотности жидкой составляющей.

Список литературы

1. Круть А.А. Развитие физико-технических основ технологий приготовления и гидротранспортирования водоугольных суспензий высокой концентрации: дис. ... докт. техн. наук. Днепрпетровск, 2011. 279 с.

2. Свитлый Ю.Г., Круть А.А. Гидравлический транспорт твердых материалов. Донецк: Восточный издательский дом, 2010. 268 с.

3. Баранова М.П. Технологии получения и использования топливных водоугольных суспензий из углей различной степени метаморфизма: дис. ... докт. техн. наук. Москва, 2014. 275 с.

4. Овчинников Ю.В., Бойко Е.Е. Технология получения и исследования тонкодисперсных водоугольных суспензий: монография. Новосибирск: НГТУ, 2017. 308 с.

5. Луговицкая Т.Н. Водные растворы лигносульфонатов, додецилсульфата натрия и их бинарные смеси: коллоидно-химические аспекты // Актуальные проблемы науки и образования в области естественных и сельскохозяйственных наук: материалы VI международной научно-практической конференции. Петропавловск: Издательство Северо-Казахстанского университета имени Манаша Козыбаева, 2018. С. 183–189.

6. Савицкий Д.П., Макарова К.В., Макаров А.С. Поверхностно-активные свойства водных растворов лигносульфоната натрия // Химия растительного сырья. 2012. № 2. С. 41–45.