



## ИССЛЕДОВАНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИОННЫХ СУСПЕНЗИОННЫХ ТОПЛИВ

Зверева<sup>1</sup> Э.Р., Мингалеева<sup>1</sup> Г.Р., Валиуллин<sup>1</sup> Б.Р., Зверев<sup>2</sup> Л.О., Липатов<sup>2</sup> М.С.

<sup>1</sup>Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, г. Санкт-Петербург, Россия

**Резюме:** ЦЕЛЬ. Рассмотрены особенности реологического поведения композиционных мазутоугольных суспензий в зависимости от скорости сдвига, температуры и состава композиционного топлива. МЕТОДЫ. Были приготовлены суспензии с содержанием угля 30, 40 и 50% (по массе). Время перемешивания изменялось от 1 до 10 мин. Пробы мазутоугольного топлива были исследованы с помощью ротационного вискозиметра Rheomat RM 100 на предмет определения значений динамической вязкости при различных скоростях сдвига и температуре. РЕЗУЛЬТАТЫ. Получены результаты экспериментальных исследований динамической вязкости мазутоугольного топлива в зависимости от скорости сдвига и температуры. Определены наилучшие значения содержания угольной пыли в мазутоугольных суспензиях для транспортировки топлива. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Полученные результаты исследования могут быть использованы как предприятиями энергетики, так и транспортными компаниями для определения технологических показателей вязкости композиционных суспензионных топлив, используемых как котельное топливо и топливо для судовых двигателей.

**Ключевые слова:** мазут; уголь; мазутоугольная суспензия; динамическая вязкость; скорость сдвига.

**Для цитирования:** Зверева Э.Р., Мингалеева Г.Р., Валиуллин Б.Р., Зверев Л.О., Липатов М.С. Исследование реологических свойств композиционных суспензионных топлив // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. № 1. С. 143-153. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-1-143-153.

## INVESTIGATION OF RHEOLOGICAL PROPERTIES OF COMPOSITE SUSPENSION FUELS

ER. Zvereva<sup>1</sup>, GR. Mingaleeva<sup>1</sup>, BR. Valiullin<sup>1</sup>, LO Zverev<sup>1</sup>, MS. Lipatov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

<sup>2</sup>Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design,  
Saint Petersburg, Russia

**ABSTRACT: THE PURPOSE.** The features of the rheological behavior of composite fuel oil suspensions depending on the shear rate, temperature and composition of the composite fuel are considered. **METHODS.** Suspensions with a coal content of 30, 40 and 50% (by weight) were prepared. The mixing time varied from 1 to 10 minutes. The samples of fuel oil were examined using a Rheomat RM 100 rotary viscometer to determine the values of dynamic viscosity at different shear rates and temperature. **RESULTS.** The results of experimental studies of the dynamic viscosity of fuel oil as a function of the shear rate and temperature are obtained. The best values of coal dust content in fuel oil suspensions for fuel transportation have been determined. **CONCLUSION.** The obtained research results can be used by both energy companies and transport companies to determine the technological viscosity indicators of composite suspension fuels used as boiler fuel and fuel for marine engines.

**Keywords:** fuel oil; coal; coal-oil suspension; dynamic viscosity; shear rate.

**For citation:** Zvereva ER, Mingaleeva GR, Valiullin BR, Zverev LO, Lipatov MS. Investigation of rheological properties of composite suspension fuels. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2023; 25 (1): 143-153. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-1-143-153.

### **Введение (Introduction)**

В настоящее время в Российской Федерации и в мире возрастает интерес к использованию альтернативных топлив в малой и средней энергетике. Однако использование угля или продуктов его переработки требует внедрения новых экологически чистых технологий, поскольку сжигание угля сопровождается выделением большого количества вредных веществ в атмосферу (оксиды серы и азота, являющиеся источником «кислотных дождей», образования фотохимического смога и разрушении озонового слоя).

Один из путей снижения вредных выбросов – использование угля в виде суспензионного водоугольного топлива (ВУТ). Наиболее эффективной технологией сжигания забалластированных топлив, полученных на основе угольных шламов или отходов углеобогащения, является технология вихревого сжигания.

Работы по созданию композиционных и эмульсионных топлив с заданными физико-химическими и эксплуатационными свойствами проводятся отечественными, и зарубежными исследователями в течении длительного времени еще с начала прошлого века. При проведении данных исследований решаются несколько основных задач: снижение выбросов загрязняющих веществ за счет интенсификации сжигания и взаимного влияния компонентов; использование отходов производства и переработки в качестве одного из горючих компонентов, например, угольные и нефтяные шламы, замазученные стоки; снижение стоимости органического топлив за счет использования более дешевых и доступных составляющих [1-3].

Наибольший прогресс достигнут в использовании водоугольных топлив (ВУТ), имеется опыт их успешного промышленного применения в качестве топлива для котлов и дизельных двигателей [3-9].

В Институте горючих ископаемых, НПО «Гидротрубопровод» и других научных центрах выполнен значительный объем работ по созданию технологии приготовления, транспортирования и сжигания водоугольных суспензий (ВУС) из каменного и бурого угля разных марок. Был спроектирован и построен опытно-промышленный комплекс, который включал в себя терминал приготовления ВУТ расчетной производительностью 400 тыс. т/год, трубопровод длиной 262 км и терминал приема и сжигания ВУС на ТЭС в Новосибирске.

В шестидесятых годах прошлого века спроектирована и построена первая установка по производству и сжиганию в котле ДКВР-6.5/13 водоугольной суспензии производительностью 9 тыс.т в год топлива на шахте Лутугинская-Северная (Донбасс). В 1968 г. завершен весь запланированный цикл опытно-промышленных исследований на установке: разработаны и опробованы технологии приготовления и сжигания водоугольных суспензий из каменных углей марок Г и Т, а также антрацитов.

Определенный опыт применения ВУТ накоплен также в некоторых странах, в том числе в Китае и США. Китай занимает первое место в мире по объему добычи и потреблению угля (более 1 млрд т/год), почти вся его энергетика (95 %) основана на нем. В течение нескольких лет Китай совместно с Японией разрабатывает проекты приготовления в Китае угольных суспензий и транспортирования их танкерами к прибрежным ТЭС Японии, где они используются совместно с мазутом и вместо него. Часть этих проектов прошла завершающую стадию и реализована в промышленном масштабе.

Первой фирмой, разработавшей промышленную технологию производства и утилизации угольномазутных суспензий, стала корпорация «Мицубиси». С 1985 г. такое топливо используют в двух энергоустановках мощностью 265 МВт каждая. На ВУС работает пилотная ТЭС мощностью 7,5 МВт при расходе топлива 3,2 т/ч. Агрегаты мощностью 60 и 100 МВт потребляют ВУС до 21 т/ч. На некоторых приморских ТЭС были модернизированы системы сжигания и золоудаления, что позволяет использовать водоугольное топливо в промышленном масштабе. Суспензию сжигают совместно с мазутом, как правило, ночью или во время значительного снижения нагрузок.

В США, Голландии, Германии, Испании и Италии построены агрегаты с комбинированным парогазовым циклом мощностью 60...300 МВт. Две ТЭС в США (в штатах Индиана и Флорида) рассчитаны на использование ВУС. Мощность газовой турбины ТЭС в Индиане составляет 191, паровой — 10 МВт; во Флориде мощность

газовой турбины 192, паровой — 130 МВт. Рассчитанный и измеренный КПД равен 42 %, тогда как у ТЭС обычного типа 35 % .

Кардинальная политико-экономическая проблема альтернативных топлив на основе угля базируется на том факте, что промышленные запасы угля значительно шире и равномернее распространены по земному шару, чем совокупные запасы нефти и газа, а в энергетическом эквиваленте многократно их превосходят. Огромные залежи угля сосредоточены в России, Китае, США, Австралии, Канаде, ЮАР и во многих других странах. Добыча и транспортирование угля на любые, особенно дальние, расстояния механизированы и четко организованы. Поэтому перспектива использования угля, сжигаемого как жидкое топливо, вместо нефтепродуктов представлялась весьма перспективной [10-15].

Интересным и перспективным направлением является приготовление и использование мазутоугольных топлив. Областью их применения могут быть как предприятия энергетики, так и транспортные средства, особенно судовые и тепловозные двигатели. Среди судовых дизельных двигателей наилучшие перспективы имеются у малооборотных двигателей, использующих тяжелое нефтяное топливо, при эксплуатации которых возникают проблемы, связанные с транспортировкой, плохой воспламеняемостью, нестабильностью горения и несовместимостью с другими марками топлив. Кроме того, за счет более низкой цены угля по сравнению с нефтяным топливом, использование мазутоугольных суспензий может способствовать снижению себестоимости перевозок. Но, прежде чем рекомендовать данные виды композиционного топлива к широкому применению, необходимо провести исследование основных физико-химических и эксплуатационных свойств полученных композиционных смесей [16-20].

Эксплуатационные свойства композиционных суспензионных топлив зависят от многих факторов: содержания компонентов, их свойств, способа смешения компонентов, температуры. Влияние данных факторов на физико-химические и эксплуатационные характеристики данных суспензий неоднозначно и не до конца установлено. Поэтому их исследование является важной и актуальной задачей [21-27].

Свойства создаваемых композиционных топлив должны рассматриваться в комплексе и в соответствии нормативным требованиям. Целью данной работы являлось исследование возможностей изменения реологических свойств топливных мазутов путем добавления угольной пыли, а также определение степени снижения вязкости полученного композиционного топлива при различных скоростях сдвига.

#### *Состав композиционного мазутоугольного топлива*

В качестве объекта исследования изучалось мазутоугольное топливо на основе мазута М100 и угольной пыли. Свойства приготовленных на основе мазута суспензионных топлив зависят от характеристик составляющих компонентов – мазута и угольной пыли.

В качестве дисперсной фазы обычно используется твердое топливо различных видов – каменные и бурые угли, торф. Известно использование в качестве добавок к твердой фазе твердых остатков переработки угля и нефти, например кокса, каменноугольного дегтя, сланцевой и коксовой смол.

Поверхностные свойства дисперсий из каменных углей прежде всего определяются степенью метаморфизма последних: соотношением гидрофильных группировок, например  $\text{COOH}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{OH}$ ,  $\text{NH}_2$  и др., и гидрофобных фрагментов гидрофильных группировок, например  $\text{C}_n\text{H}_{n+1}$ ,  $\text{SH}$ .

Высокометаморфизированные угли (битуминозные угли марок Т, А, ТА) характеризуются низким содержанием кислорода в поверхностном слое. Вследствие этого они имеют в целом гидрофобную поверхность, плохо смачиваются водой, не образуют развитого гидратированного слоя вокруг частиц, а содержащие их в качестве твердой фазы суспензионные топлива не имеют выраженной способности к образованию структурных каркасов в системе, т.е. обладают определенной агрегативной устойчивостью, но слабой седиментационной устойчивостью.

Частицы углей низких стадий метаморфизма (суббитуминозных каменных углей марок Д, Г, ДГ) характеризуются высокой гидрофильностью поверхности.

Вследствие этого они обладают выраженной способностью к образованию развитых гидратных слоев вокруг себя и благодаря этому – прочных структурных каркасов в топливных коллоидных системах. Такие системы характеризуются выраженной седиментационной устойчивостью.

Высокая гидрофильность поверхности частиц бурых углей и торфа обусловлена высоким содержанием кислородсодержащих функциональных групп. Кроме того, для

поверхности этих частиц характерны высокая пористость и наличие воды, что создает трудности при использовании бурых углей и торфа в качестве топлива.

Каменные угли различной природы являются наиболее распространенным видом твердого ископаемого топлива. Это неоднородные твердые вещества черного или черно-серого цвета, включающие четыре типа частиц, различающихся по блеску, внешнему виду и составу: блестящий (витрен), полублестящий (кларен), матовый (дюрен) и волнистый (фюзен). Соотношение этих ингредиентов, входящих в органическую массу каменных углей, характеризует их структуру, химический и минералогический состав и обуславливает их многообразие и различие свойств.

В состав органической части каменных углей входят битумы, гуминовые кислоты и остаточный уголь. Молекулярная структура органической части угля представляет собой жесткий трехмерный полимер нерегулярного строения, содержащий подвижную фазу в виде разнообразных мономолекулярных соединений. Обе фазы построены из отдельных фрагментов, включающих ароматические, в том числе многоядерные и гидрированные системы с алифатическими заместителями, и азотсодержащие гетероциклы, соединенные мостиковыми связями C-C, C-O-C, C-S-C и C-NH-C. Степень конденсированности фрагментов зависит от степени углефикации каменного угля. В составе каменных углей установлено также наличие различных функциональных групп: гидроксильной (спиртовые и фенольные), карбонильной, карбоксильной и серосодержащих групп -SR- и -SH.

Важнейшими характеристиками каменных углей, от которых зависят возможность и эффективность их использования, являются зольность, влажность, сернистость, выход летучих веществ и механические свойства, а для углей, применяемых в качестве сырья для термохимической переработки, также спекаемость и коксующесть [2-3, 9].

Общие запасы угля в России составляют 173 млрд т. Россия занимает второе место в мире по запасам угля с долей в 17 % от общемировых запасов. Наличие угля в топливно-энергетическом балансе повышает энергетическую безопасность и надежность энергоснабжения. С точки зрения энергетики в 2021 г. добыча угля в стране достигла почти 440 млн т, на экспорт было отправлено более 223 млн т. Внутреннее потребление составило почти 184 млн т из них 91,4 млн т на обеспечение электростанций, на нужды коксования – 38,3 млн т, население и коммунально-бытовые нужды – 27,7 млн т, и порядка 26 млн т приходится на прочих потребителей. Угольная генерация составляет до 13 % в энергобалансе России (более 25 млн человек получают отопление за счёт угольной генерации).

Мазут - углеводородное вязкое топливо, на электростанциях и в котельных в настоящее время используется как растопочное, вспомогательное и аварийное топливо. В зависимости от назначения различают флотские (Ф-5 и Ф-12) и топочные (котельные) (М40, М100, М200) мазуты. Нормативные требования на мазут определены ГОСТ 10585-2013.

Мазут - это горючая жидкость с температурой вспышки, в зависимости от марки 80-110 °С. Взрывоопасная концентрация паров мазута в смеси с воздухом 1,4-8% [28]. Топочные мазуты марки М 40 относятся к категории средних, топочные мазуты марок М 100 и М 200 - к категории тяжелых топлив.

В зависимости от содержания серы топочные мазуты подразделяются на ряд сортов: низкосернистые ( $S^p \leq 0,5\%$ ), малосернистые ( $0,5 < S^p \leq 1,0\%$ ), сернистые ( $1,0 < S^p \leq 2,0\%$ ), высокосернистые ( $2,0 < S^p \leq 3,5\%$ ). Как правило, на электростанциях и в котельных поступают сернистые и высокосернистые мазуты.

Состав топочных мазутов в основном совпадает с составом исходной нефти, из которых их получают. Мазуты - это сложные коллоидные системы, образующие в области температуры застывания псевдокристаллическую структуру, характеризующуюся высокими значениями вязкости и высокой плотностью. Мазуты содержат значительное количество асфальто-смолистых веществ, серы, ванадия и азота.

Элементный состав горючей части мазута близок к элементному составу нефти, а в случае малосернистого мазута он практически не отличается от состава исходной нефти.

Преобладающими элементами являются углерод (85÷87%) и водород (10÷12%) [28].

#### **Материалы и методы (Materials and methods)**

##### *Технология приготовления композиционных мазутоугольных топлив (МУТ)*

При проведении экспериментов были подготовлены пробы мазутоугольных топлив на основе топочного мазута М100 и угля марки Т (тощий) Кузнецкого бассейна. Уголь измельчался при помощи вибрационной мельницы ВМ-45 и мельницы-активатора 2SL. Рассев угольной пыли на фракции производился на ситовом анализаторе А-30. Расчет

состава смеси проводился аддитивным способом в соответствии с массовой долей компонентов.

Пробы МУС на основе Кузнецкого тощего угля были приготовлены и исследованы на экспериментальной установке, представленной на рисунке 1.

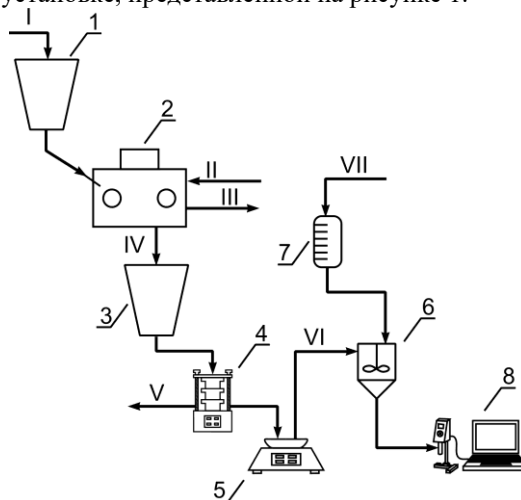


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментального стенда для приготовления МУС и исследования его реологических свойств: 1 – бункер-питатель; 2 – вибрационная мельница; 3 – бункер для пыли; 4 – виброустановка для проведения ситового анализа; 5 – весы; 6 – смеситель; 7 – мерная емкость; 8 – ротационный вискозиметр; I – дробленый уголь; II – подача охлаждающей воды; III – отвод охлаждающей воды; IV – угольная пыль; V – угольная пыль на хранение; VI – угольная пыль бифракционного состава; VII – вода для приготовления ВУТ [16].

Fig. 1. Schematic diagram of an experimental stand for the preparation of MUS and the study of its rheological properties: 1 – feeder hopper; 2 – vibrating mill; 3 – dust hopper; 4 – vibration unit for sieve analysis; 5 – scales; 6 – mixer; 7 – dimensional container; 8 – rotary viscometer; I – crushed coal; II – supply of cooling water; III – removal of cooling water; IV – coal dust; V – coal dust for storage; VI – coal dust of bifractional composition; VII – water for the preparation of VUT [16].

Дробленый уголь из бункера 1 направлялся на измельчение в вибрационную мельницу. Из полученной угольной пыли были взяты пробы угольной пыли, которые подвергались фракционированию, а затем ситовому анализу на виброустановке 4 с размерами сит 0,2; 0,125; 0,09; 0,063; 0,05 мм. Доля угля в суспензии определялась по массе. После взвешивания порций угольной пыли готовилась мазутоугольная суспензия путем перемешивания компонентов в смесителе 6.

Реологические характеристики исследовались посредством универсального вискозиметра RM 100. Скорость сдвига при испытаниях плавно увеличивалась – от 0 до 72,5 с<sup>-1</sup>.

Технологические свойства мазутоугольных композиционных топлив (МУТ) определяются следующими характеристиками:

- содержанием дисперсной фазы (угля);
- дисперсностью частиц угля (размером частиц и равномерностью их распределения);
- вязкостью и ее зависимостью от скорости и температуры транспортирования;
- стабильностью - динамической (при транспортировании по трубам и в танкерах) и статической (в резервуарах);
- содержанием и составом минеральных примесей, включая такие экологически вредные, как соединения серы и другие токсичные вещества.

Непременным элементом технологии приготовления МУТ является смешение мазута и угля. Обычно МУТ готовят непосредственно в диспергаторах или эмульгаторах, что связано со значительными затратами энергии. При проведении экспериментов приготовление мазутоугольной суспензии осуществляется в два этапа. На первом этапе уголь подается непосредственно в емкость для хранения топлив. На втором этапе суспензия перемешивается в смесителе, в котором обеспечивается равномерное распределение частиц в объеме мазута.

При продолжительном хранении (более 30 суток) МУТ постепенно расслаивается. При применении механического воздействия (перемешивания) происходит восстановление первоначальной структуры суспензии.

*Описание объекта исследования – мазутоугольных суспензий*

Исследовались мазутоугольные суспензии, приготовленные на основе малосернистого мазута М100, имеющего следующие характеристики:

- вязкость при 80°C условная – не более 16,0 °ВУ;
- кинематическая вязкость при 50°C – не более 118,0 м<sup>2</sup>/с;
- зольность для зольного мазута – не более 0,14%;
- массовая доля механических примесей – 1,5%;
- массовая доля серы – не более 0,5%;
- температура вспышки в открытом тигле – не более 110°C;
- температура застывания – не более 25°C;
- плотность – не более 1015 кг/м<sup>3</sup>.

Дисперсной фазой при проведении экспериментов являлся уголь марки Т (тощий) Кузнецкого бассейна, дробленый до крупности 20 мм, насыпная плотность дробленого угля - 920 кг/м<sup>3</sup>, истинная 1440 - кг/м<sup>3</sup>, диаметр кусков угля от 0 до 20 мм. Форма кусков – изометрически неправильная, несферичная, угловатая. Вещество частиц – аморфное. Цвет частиц – черный с блеском в местах излома, а также угольная пыль, полученная в результате измельчения в течение 5-20 мин.

Были приготовлены суспензии с содержанием угля 30, 40 и 50% (по массе). Время перемешивания изменялось от 1 до 10 мин. Пробы мазутоугольного топлива были исследованы с помощью ротационного вискозиметра *Rheomat RM 100* на предмет определения значений динамической вязкости при различных скоростях сдвига. Определение динамической вязкости заключалось в измерении напряжения сдвига, возникающего в исследуемом образце композиционного топлива, помещенного в узкий зазор между вращающимся и неподвижным коаксиальными цилиндрами. Угловая скорость варьировалась в широких пределах – от 0 до 72,5 с<sup>-1</sup>. Вращающий момент в измерительной системе, пропорциональный тангенциальному напряжению в кольцевом зазоре, измерялся и преобразовывался в электрический сигнал. Значения вязкости вычислялись при помощи встроенного микропроцессора, анализирующего изменения крутящего момента и скорости сдвига. Температура образца измерялась погружением датчика температуры Pt100 в исследуемый образец мазута. Нагрев образцов МУТ осуществлялся за счет передачи тепла от тормозной жидкости, находящейся в стакане, в которую погружен цилиндр с исследуемым образцом. Изменение температуры тормозной жидкости происходит за счет электрического нагрева. Измерения вязкости МУТ производились при различных температурах и скоростях сдвига. Работа вискозиметра производится управлением с персонального компьютера через программное обеспечение “*VISCORM SOFT*”.

**Обсуждение результатов (Results)**

Результаты экспериментальных исследований с учетом погрешности эксперимента в графическом виде представлены на рисунках 2–4.

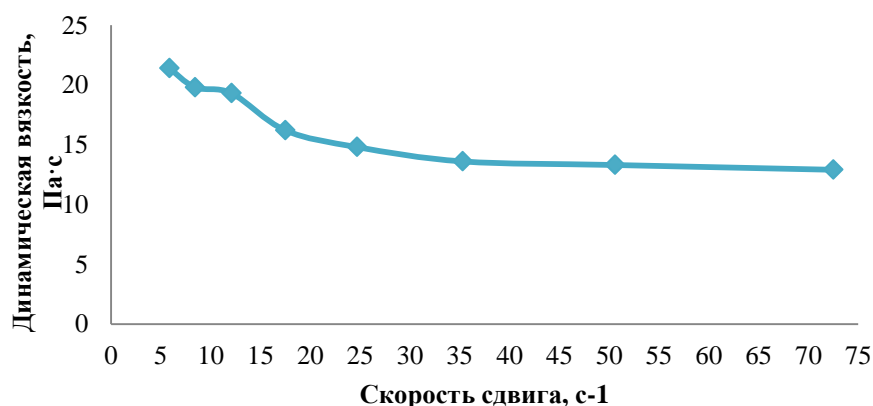


Рис. 2 Результаты экспериментальных исследований процесса приготовления мазутоугольного топлива с содержанием угольной пыли 30% (масс.) при  $t_{cp} = 38^{\circ}\text{C}$

Fig. 2. Results of experimental studies of the process of preparation of fuel oil with a coal dust content of 30% (mass) at  $t_{cp} = 38^{\circ}\text{C}$

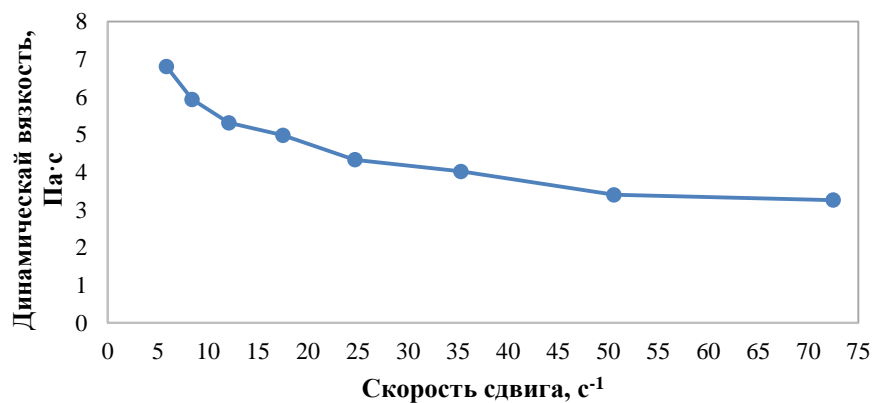


Рис. 3 Результаты экспериментальных исследований процесса приготовления мазутоугольного топлива с содержанием угольной пыли 40% (масс.) при  $t_{\text{ср}} = 53^\circ\text{C}$

Fig.3 Results of experimental studies of the process of preparation of fuel oil with a coal dust content of 40% (wt.) at  $t_{\text{ср}} = 53^\circ\text{C}$

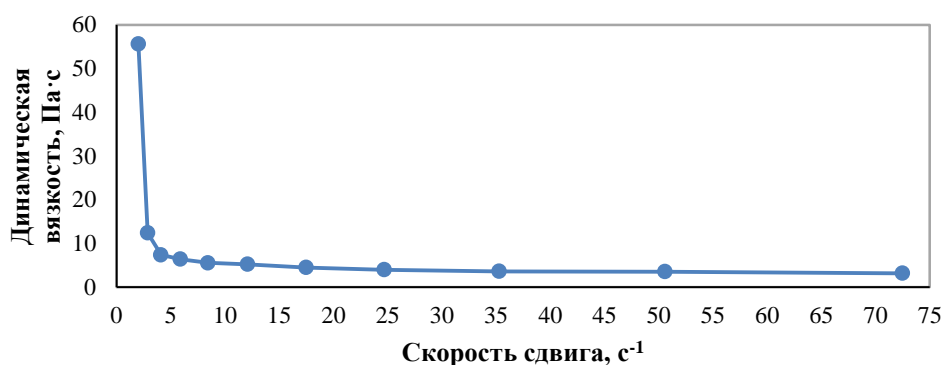


Рис. 4 Результаты экспериментальных исследований процесса приготовления мазутоугольного топлива с содержанием угольной пыли 50% (масс.) при  $t_{\text{ср}} = 50^\circ\text{C}$

Fig. 4 Results of experimental studies of the process of preparation of fuel oil with a coal dust content of 50% (wt.) at  $t_{\text{ср}} = 50^\circ\text{C}$

Из рисунков 2-4 видно, что с повышением скорости перемещения слоев топлива до  $75 \text{ с}^{-1}$  вязкость суспензии уменьшается до определенного предела, это связано с тем, что микрочастицы угольной пыли распределяется между слоями мазута, снижая трение между ними.

Из рисунка 2 (результаты экспериментальных исследований процесса приготовления мазутоугольного топлива с содержанием угольной пыли 30% (масс.) при  $t_{\text{ср}} = 38^\circ\text{C}$ ) видно, что при скорости сдвига  $5,88 \text{ с}^{-1}$  значения динамической вязкости уменьшаются до  $21,4 \text{ Па} \cdot \text{с}$ ; при  $72,5 \text{ с}^{-1}$  до  $8,10 \text{ Па} \cdot \text{с}$ .

Из рисунка 3 (результаты экспериментальных исследований процесса приготовления мазутоугольного топлива с содержанием угольной пыли 40% (масс.) при  $t_{\text{ср}} = 53^\circ\text{C}$ ) видно, что при скорости сдвига  $5,88 \text{ с}^{-1}$  значения динамической вязкости уменьшаются до  $6,80 \text{ Па} \cdot \text{с}$ ; при  $72,5 \text{ с}^{-1}$  до  $2,10 \text{ Па} \cdot \text{с}$ ;

Из рисунка 4 (результаты экспериментальных исследований процесса приготовления мазутоугольного топлива с содержанием угольной пыли 50% (масс.) при  $t_{\text{ср}} = 53^\circ\text{C}$ ) видно, что при скорости сдвига  $5,88 \text{ с}^{-1}$  значения динамической вязкости уменьшаются до  $6,80 \text{ Па} \cdot \text{с}$ ; при  $72,5 \text{ с}^{-1}$  до  $3,20 \text{ Па} \cdot \text{с}$ .

При увеличении концентрации угольной пыли до 50% (масс.) возможно происходит агрегирование слоев и их взаимное торможение, что приводит к увеличению вязкости суспензии по сравнению с вязкостью МУТ, содержащей меньшее количество угольной фракции.

Как видно из приведенных выше рисунков, введение угольной пыли позволяет улучшить эксплуатационные свойства топочных мазутов – снизить вязкость чистого мазута, что минимизирует затраты при подготовке и транспортировке топлива. Значение угольной пыли (до 40 %) заключается в модификации поверхности кристаллов парафинов таким образом, что они теряют способность к слипанию, в результате чего снижаются значения

вязкости мазута. Суть механизма действия угольной пыли в мазуте состоит в повышении стабильности гетерогенной системы, вследствие уменьшения размера частиц ее дисперсной фазы, а взаимодействие частиц угля с мазутными дисперсными системами происходит по адсорбционному механизму, уменьшает их поверхностную энергию и препятствует сближению и ассоциации кристаллов парафинов в упорядоченную структуру.

#### **Выводы (Conclusions)**

Таким образом, показано, что при использовании композиционного топлива (с содержанием угольной пыли до 40 %) возможно получать более низкие значения вязкости, в связи с чем уменьшаются энергетические затраты на подогрев топлива и его перекачку по трубопроводам. Полученные результаты исследования могут быть использованы как предприятиями энергетики, так и транспортными компаниями для определения технологических показателей вязкости композиционных суспензионных топлив, используемых как котельное топливо и топливо для судовых двигателей.

#### **Литература**

1. Кулагина Т.А. Разработка режимов сжигания водотопливных смесей, получаемых путем кавитационной обработки /Т.А. Кулагина // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2007. – № 2. – С. 28-31.
2. Гордеев И.В. Состояние, проблемы и перспективы угольной энергетики России / И.В. Гордеев, М.И. Логвинов, В.Н. Микерова, Г.И. Старокожева // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. – 2022. – № 3-4 (178). – С. 58-64.
3. Галькеева А.А. Анализ применения углей различных марок для производства энергии и химических продуктов // А.А. Галькеева, Г.Р. Мингалеева, С.Ю. Горбунов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2015. – № 11-12. – С. 69-79.
4. Ильин А.К. О максимальной теоретической температуре горения водотопливных эмульсий / А.К. Ильин, Р.А. Ильин // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2010. – № 3-4. – С. 8-10.
5. Ходаков Г.С. Водоугольные суспензии в энергетике // Теплоэнергетика. – 2007. – № 1. – С. 35-45.
6. Selvan V.A.M., Anand R.B., Udayakumar M. Experimental investigation by utilizing nano alumina with waste cooking oil biodiesel fuel in CI engine // Environmental Science and Pollution Research. – 2020. – V. 25. – P. 33478–33489.
7. Мурко В.И. Вихревой способ сжигания водоугольного топлива из шламов углеобогащения // В.И. Мурко, В.И. Карпенко, М.П. Баранова // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. – 2022. – Т. 15. – № 3. – С. 338-345.
8. Dmitrienko M.A. Environmental indicators of the combustion of prospective coal water slurry containing petrochemicals / M.A. Dmitrienko, G.S. Nyashina, P.A. Strizhak // Journal of Hazardous Materials. 2017. – № 338. P. 148-159.
9. Эшметов И.Д. Получение водоугольно-топливной суспензии на основе кондиционных товарных углей Ангреновского месторождения путем их модификации мазутом // И.Д. Эшметов, Д.С. Салиханова, А.А. Агзамходжаев // Химическая промышленность. – 2014. – Т. 91. – № 3. – С. 126-130.
10. Жизнин С.З. Экономические и экологические аспекты внедрения чистых угольных технологий в Китае // С.З. Жизнин, А.В. Черечукин // Уголь. – 2019. – № 12 (1125). – С. 56-58.
11. Линник Ю.Н. Анализ конъюнктуры и прогноз рынка угля // Ю.Н. Линник, В.Ю. Линник, А.Б. Жабин, А.В. Поляков, А. Цих // Уголь. – 2020. – № 5 (1130). – С. 34-38.
12. Ефимов В.И. Перспективы развития добычи угля в Кузнецком бассейне / В.И. Ефимов, И.Б. Никулин, Г.Г. Рябов // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2015. – № 1. – С. 101-108.
13. Thomson R.V., Katsoulakos P. S. The application of emulsified fuels in diesel engine designs: experimental results and theoretical predictions // Trans. Inst. Mar. Eng. – 1985. – V. 97. – P. 10-20.
14. Кудряшов А.Н. опыт сжигания композиционного топлива на основе угольного шлама на ТЭЦ Иркутской области // А.Н. Кудряшов, Т.В. Коваль, М.И. Ижганайтис // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2021. – Т. 23. – № 1. – С. 33-45.
15. Shukla S.C. Coal-oil-water multiphase Fuel: Rheological behavior and prediction of optimum particle size / S.C. Shukla, S. Kukade, S.K. Mandal, et al // Fuel. – 2008. – Vol. 87. – № 15-16. – P. 3428-3432.



16. Glushkov D.O. Ignition of composite liquid fuel droplets based on coal and oil processing waste by heated air flow / D.O. Glushkov, P.A. Strizhak // Journal of Cleaner Production. – 2017. – N 165. – P. 1445-1461.
17. Мансуров З.А. Некоторые проблемы экологичного сжигания водоугольных смесей // З.А. Мансуров, В.Г. Сальников // Горение и плазмохимия. – 2021. – Т. 19. – № 4. – С. 279-288.
18. Вафин А.Р. Исследование основных свойств мазутоугольных топлив // А.Р. Вафин, Г.Р. Мингалеева // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2015. – № 5-6. – С. 8-15.
19. Шадрин Е.Ю. Исследование процесса распыления и сжигания водоугольного топлива с использованием пневматической форсунки // Е.Ю. Шадрин, И.С. Ануфриев, О.В. Шарыпов // Прикладная механика и техническая физика. – 2021. – Т. 62. – № 3 (367). – С. 165-171.
20. Zhao Z., Wang R., Ge L., et al. Energy utilization of coal-coking wastes via coal slurry preparation: the characteristics of slurring, combustion, and pollutant emission/ Z. Zhao, R. Wang, L. Ge, et al. // Energy. – 2019. – Vol. 168. – P. 609-618.
21. Коркембай Ж. Исследование горения водоугольных смесей / Ж. Коркембай, Б.Г. Топанов, Е. Жуматаев, Б. Кайдар, З.А. Мансуров // Горение и плазмохимия. – 2021. – Т. 19. – № 4. – С. 339-346.
22. Зенков А.В. Влияние жидких горючих компонент на вязкость водоугольного топлива / А.В. Зенков, Д.В. Гвоздяков, В.Е. Губин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2020. – Т. 20. – № 3. – С. 26-32.
23. El-Seesy A.I. The Influence of Multi-walled Carbon Nanotubes Additives into Non-edible Biodiesel-diesel Fuel Blend on Diesel Engine Performance and Emissions/ A.I. El-Seesy, A.K. Abdel-Rahman, M. Bady, S. Ookawara // Energy Procedia. 2016. V. 100. P. 166.
24. Basha J.S., Anand R.B. Performance, emission and combustion characteristics of a diesel engine 4 using Carbon Nanotubes blended Jatropha Methyl Ester Emulsions // Alexandria Engin. J. 2014. V. 53. № 2. P. 259.
25. Мурко В.И. Получение и использование углемасляного гранулята / В.И. Мурко В.И., А.Н. Заостровский, А.Е. Аникин, Е.Н. Темлянцева // Кокс и химия. – 2022. – № 10. – С. 45-50.
26. Сыродой С.В. Совместное зажигание водоугольной суспензии и древесной биомассы // С.В. Сыродой, Д.Ю. Малышев, Ж.А. Косторева // Промышленная энергетика. – 2020. – № 5. – С. 44-49.
27. Хилько С.Л. Особенности реологического поведения коллоидных топлив / С.Л. Хилько // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. – 2011. – № 1 (6). – С. 47-51.
28. Зверева Э.Р. Вторичное использование малосернистых нефтяных остатков в качестве основы для котельного и судового топлива / Э.Р. Зверева, А.О. Макарова, Ю.В. Бахтиярова, В.И. Королев, Н.П. Ильин, А.Н. Туранов, О.С. Зуева // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2022. – № 1. – Т. 24. – С. 16-28.
29. Мингалеева Г.Р. Экспериментальное исследование вязкости водоугольной суспензии с бифракционным составом дисперсной фазы / Г.Р. Мингалеева, Д.В. Ермолаев, О.В. Афанасьева, С.С. Тимофеева // Теплоэнергетика. – 2012. – № 6. – С. 28-30.
30. Зверева Э. Р. Улучшение вязкостных характеристик котельного топлива присадками / Э. Р. Зверева, Г. Р. Мингалеева, Р. В. Хабибуллина, Г. Р. Ахметвалиева // Нефтехимия – 2016. – Т. 56. – № 1. – С. 73–75.

#### **Авторы публикации**

**Зверева Эльвира Рафиковна** – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Экология и безопасность труда» Казанского государственного энергетического университета.

**Мингалеева Гузель Рашидовна** – д-р техн. наук, доцент, заведующая кафедрой «Энергетическое машиностроение» Казанского государственного энергетического университета.

**Валиуллин Булат Рамилевич** – аспирант, Казанского государственного энергетического университета.

**Зверев Леонид Олегович** – магистрант Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна.

**Липатов Максим Сергеевич** – старший преподаватель кафедры теплосиловых установок и тепловых двигателей, аспирант Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна.

### References

1. Kulagina T.A. Development of combustion modes of water-fuel mixtures obtained by cavitation treatment. *Chemical and oil and gas engineering*. 2007;2:28-31.
2. Gordeev IV, Logvinov MI, Mikerova VN. The state, problems and prospects of coal energy in Russia. *Mineral Resources of Russia. Economics and management*. 2022;3-4 (178):58-64.
3. Galkeeva AA, Mingaleeva G.R, Gorbunov S.Y. Analysis of the use of coals of various grades for the production of energy and chemical products. *Izvestia of higher educational institutions. Energy problems*. 2015;11-12:69-79.
4. Ilyin AK, Ilyin RA. On the maximum theoretical gorenje temperature of water-fuel emulsions. *News of higher educational institutions. Energy problems*. 2010;3-4:8-10.
5. Khodakov GS. Coal-water suspensions in power engineering. *Teploenergetika*. 2007;1:35-45.
6. Selvan VAM, Anand RB, Udayakumar M. Experimental study of the use of nanoglinozem with biodiesel fuel from vegetable oil waste in the CI engine. *Environmental science and pollution research*. 2020;25:33478-33489.
7. Murko V, Karpenko VI, Baranova MP. And the vortex method of burning coal-water fuel from coal-enrichment sludge. *Journal of the Siberian Federal University. Series: Engineering and Technology*. 2022. 15(3).P. 338-345.
8. Dmitrienko MA, Dmitrienko GS, Nyashina PA. Strizhak Environmental indicators of the combustion of prospective coal water slurry containing petrochemicals. *Journal of Hazardous Materials*. 2017;338:148-159.
9. Eshmetov ID, Salikhanov DS., Agzamkhodzhaev AA. Obtaining a water-coal-fuel suspension based on conditioned commercial coals of the Angren deposit by modifying them with fuel oil. *Chemical industry*. 2014;91(3):126-130.
10. Zhiznin SZ, Cherechukin AV. Economic and environmental aspects of the introduction of clean coal technologies in China. *Coal*. 2019;12 (1125):56-58.
11. Linnik VYu, Zhabin AB. Of the conjuncture and forecast of the coal market. *Coal*. 2020;5 (1130):34-38.
12. Efimov VI, Nikulin I.B, Ryabov G.G. Prospects for the development of coal mining in the Kuznetsk basin. *Izvestiya Tula State University. Earth Sciences*. 2015;1:101-108.
13. Thomson RV, Katsoulakos PS. The application of emulsified fuels in diesel engine designs: experimental results and theoretical predictions. *Trans. Inst. Mar. Eng*. 1985;97:10-20.
14. Kudryashov AN, Koval TV, Izghanaitis MI. the experience of burning composite fuel based on coal sludge at the thermal power plant of the Irkutsk region. *Izvestia of higher educational institutions. Energy problems*. 2021;23(1):33-45.
15. Shukla SC, Kukade S, Mandal S.K., et al. Coal-oil-water multiphase Fuel: Rheological behavior and prediction of optimum particle size. *Fuel*. 2008;87(15-16):3428-3432.
16. Glushkov DO, Strizhak PA. Ignition of composite liquid fuel droplets based on coal and oil processing waste by heated air flow. *Journal of Cleaner Production*. 2017;165:1445-1461.
17. Mansurov Z, Salnikov VG. And Some problems of ecological combustion of coal-water mixtures. *Gorenje and plasmochimistry*. 2021;19(4):279-288.
18. Vafin AR, Mingaleeva G.R. Investigation of the basic properties of fuel oil fuels. *News of higher educational institutions. Energy problems*. 2015;5-6:8-15.
19. Shadrin EYu, Anufriev IS, Sharypov OV. Investigation of the process of spraying and burning coal-water fuel using a pneumatic nozzle. *Applied Mechanics and technical physics*. 2021. T. 62;3 (367):165-171.
20. Zhao Z, Wang R, Ge L, et al. Energy utilization of coal-coking wastes via coal slurry preparation: the characteristics of slurring, combustion, and pollutant emission. *Energy*. 2019;168:609-618.
21. Korkembai Zh. Gorenje Korkembai, B.G. Topanov, E. Zhumataev, et al. Investigation of combustion of coal-water mixtures. *Gorenje and plasmochimistry*. 2021;19(4):339-346.

22. Gvozdyakov DV, Gubin VE. The influence of liquid combustible components on the viscosity of coal-water fuel. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Energy*. 2020;20(3):26-32.

23. El-Seesy A.I, Abdel-Rahman A.K., Bady M. The Influence of Multi-walled Carbon Nanotubes Additives into Non-edible Biodiesel-diesel Fuel Blend on Diesel Engine Performance and Emissions. *Energy Procedia*. 2016;100:166.

24. Basha JS, Anand RB. Performance, emission and combustion characteristics of a diesel engine 4 using Carbon Nanotubes blended Jatropa Methyl Ester Emulsions. *Alexandria Engin. J*. 2014;53(2):259.

25. Murko VI, Zaostrovsky AN, Anikin AE. *Obtaining and using coal oil granulate. Coke and chemistry*. 2022;10:45-50.

26. Syrodoy SV, Malyshev DY, Kostoreva ZhA. *Joint ignition of coal-water suspension and wood biomass. Industrial energy*. 2020;5:44-49.

27. Khilko SL. Features of rheological behavior of colloidal fuels. *Modern science: research, ideas, results, technologies*. 2011;1 (6):47-51.

28. Zvereva ER, Makarova AO, Bakhtiyarova YuV, et al. Secondary use of low-sulfur oil residues as a basis for boiler and ship fuel. *News of higher educational institutions. Energy problems*. 2022;1(24):16-28.

29. Mingaleeva GR, Ermolaev DV, Afanasyeva OV. Experimental study of the viscosity of a water-coal suspension with a fractional composition of the dispersed phase. *Thermal power engineering*. 2012;6:28-30.

30. Zvereva ER, Mingaleeva GR, Khabibullina RV. Improving the viscosity characteristics of boiler fuel additives. *Petrochemistry*. 2016;56(1):73-75.

#### **Authors of the publication**

**Elvira R. Zvereva** - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

**Guzel R. Mingaleeva** - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

**Bulat R. Valiullin** - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

**Leonid O. Zverev** - Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, Saint Petersburg, Russia.

**Maxim S. Lipatov** - Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, Saint Petersburg, Russia.

**Получено** 03.02.2023г.

**Отредактировано** 10.02.2023г.

**Принято** 17.02.2023г.