

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ СВОЙСТВ МАЗУТОУГОЛЬНЫХ ТОПЛИВ

А.Р. ВАФИН, Г.Р. МИНГАЛЕЕВА

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Казанский научный центр Российской академии наук

Аннотация: в статье представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований состава, реологических и теплофизических свойств мазутоугольных топлив, приготовленных на основе мазута марки М100 и Кузнецкого тощего угля. Получены зависимости для определения динамической вязкости при различных скоростях сдвига и массовом содержании угольной пыли. Представлены значения теплоемкости и теплопроводности мазутоугольных топлив. Полученные результаты могут использоваться при расчете гидродинамических параметров при движении в трубопроводах и каналах энергетических установок и теплообменных аппаратов при использовании мазутоугольных топлив на тепловых электростанциях, в промышленных котельных и транспортных установках.

Ключевые слова: мазутоугольное топливо, динамическая вязкость, теплоемкость, теплопроводность.

Введение

Проблема рационального и эффективного использования ископаемых ресурсов может быть решена путем более широкого внедрения технологий комплексного использования природного сырья, что должно обеспечить существенное снижение количества промышленных отходов, наносящих невосполнимый вред окружающей среде. Наибольшее влияние на ее состояние оказывают энергетические и транспортные установки, в которых происходит сжигание органического топлива, что сопровождается как глобальным, так и не менее опасным – локальным – загрязнением окружающей среды.

В связи с этим в настоящее время разрабатываются различные методы повышения эффективности энергетических и транспортных установок и снижения их воздействия на окружающую среду. Данные методы можно условно разделить на две группы:

- усовершенствование конструкций энергогенерирующих агрегатов и двигателей;
- улучшение эксплуатационных свойств применяемых топлив.

Многими авторами отмечается, что возможности усовершенствования существующих конструкций, например, энергетических котлов, а для транспортных установок – двигателей внутреннего сгорания, уже подошли к своему технологическому пределу. Дальнейшее увеличение КПД достигается значительным усложнением агрегатов, появлением дополнительных устройств, что влечет за собой зачастую непропорциональное увеличение их стоимости.

Поэтому более перспективным на сегодняшнем этапе представляется второе направление – не только улучшение характеристик традиционных органических топлив, но и создание новых за счет смешения различных компонентов, в том числе и относящихся к разряду отходов производства и переработки.

Работы по созданию композиционных и эмульсионных топлив с заданными эксплуатационными свойствами проводятся как отечественными, так и зарубежными

учеными еще с 40-х годов прошлого века. Например, в работе [1] даже представлена классификация таких топлив, которая включает водоугольные, водомазутные, мазутоугольные, метанолугольные и другие виды. При проведении данных исследований прослеживается стремление решить несколько основных задач: во-первых, снизить выбросы загрязняющих веществ за счет интенсификации сжигания и взаимного влияния компонентов; во-вторых, использовать отходы производства и переработки в качестве одного из горючих компонентов, например, угольные и нефтяные шламы, замазученные стоки; в-третьих, снизить стоимость топлив за счет использования более дешевых и доступных составляющих.

Наибольший прогресс достигнут в использовании водоугольных топлив (ВУТ), имеется опыт их успешного промышленного применения в качестве топлива для котлов и дизельных двигателей [2]. При испытаниях двигателя, работающего на суспензионном водоугольном топливе, было достигнуто уменьшение выбросов оксидов азота в 2-3 раза, снизились выбросы углеводородов и монооксида углерода, однако при этом существенно увеличилось содержание твердых частиц и ангидридов в продуктах сгорания, что требует обязательного применения систем очистки газов.

Интересным и перспективным направлением является приготовление и использование мазутоугольных (в некоторых литературных источниках – углемазутных) топлив. Причем областью их использования может быть не только энергетика, но и транспорт, особенно судовые и тепловозные двигатели. Среди судовых дизельных двигателей наилучшие перспективы имеются у малооборотных двигателей, использующих в настоящее время тяжелые нефтяные топлива. Они являются практически отходами нефтепереработки, при сжигании которых возникают проблемы, связанные с плохой воспламеняемостью, нестабильностью горения и несовместимостью с другими марками топлив, наличием абразивной катализаторной мелочи [3]. Кроме того, за счет более низкой цены угольного топлива по сравнению с нефтяным, использование мазутоугольных суспензий может способствовать снижению себестоимости перевозок. Однако, прежде чем рекомендовать данные виды топлива к широкому применению, необходимо провести тщательное теоретическое и экспериментальное исследование основных эксплуатационных свойств полученных смесей.

Эксплуатационные свойства композиционных суспензионных топлив зависят от многих факторов: содержания компонентов, их свойств, способов смешения составляющих, температуры. Причем влияние некоторых факторов неоднозначно и не до конца выяснено. Поэтому их исследование является важной и актуальной задачей.

Свойства создаваемых композиционных топлив должны рассматриваться в комплексе и в перспективе точно соответствовать нормативным требованиям. Однако каждая группа свойств, например реологические или теплофизические, требует многочисленных экспериментальных и теоретических исследований для создания надежных методик определения и расчета и разработки на их основе нормативно-технических документов.

Состав мазутоугольных топлив

В качестве примера рассмотрим мазут марки М100 и мазутоугольное топливо на его основе. Свойства приготовленных на основе мазута суспензионных топлив зависят от характеристик составляющих компонентов – мазута и угольной пыли. Мазут является основным видом жидкого топлива, которое применяется на электростанциях и в котельных. Это горючая жидкость с температурой самовоспламенения 350 °С, пределами воспламенения 91-155 °С, температурой вспышки 90 °С. Взрывоопасная концентрация паров мазута в смеси с воздухом 1,4-8% [4]. Уголь представляет собой твердое органическое топливо, которое также достаточно широко используется как в

качестве основного, так и в качестве резервного топлива на энергетических объектах различного масштабного уровня.

При проведении экспериментов были подготовлены пробы мазутоугольных топлив на основе топочного мазута марки М100 и Кузнецкого угля марки Т. Уголь измельчался при помощи вибрационной мельницы ВМ-45 и мельницы-активатора 2SL. Рассев угольной пыли на фракции производился на ситовом анализаторе А-30. Состав компонентов и мазутоугольных топлив, приготовленных на их основе, представлен в табл. 1. Расчет состава смеси проводился аддитивным способом в соответствии с массовой долей компонентов.

Таблица 1

Средний состав мазутоугольных топлив и их компонентов

Показатель, %	Мазут	Уголь	Мазутоугольное топливо с содержанием угольной пыли, % (масс.)			
			4	10	14	20
$S^c_{\text{общ}}$	2,0	0,7	1,9	1,9	1,8	1,7
C^c	83,8	73,4	83,4	82,8	82,3	81,7
H^c	11,2	3,4	10,9	10,4	10,1	9,6
(O^c+N^c)	1,0	4,6	1,1	1,4	1,5	1,7
W^p	0,5	7,0	0,8	1,2	1,4	1,8
A^c	0,14	18,0	0,9	1,9	2,6	3,7

Мазуты – это сложные коллоидные системы, образующие в области температуры застывания псевдокристаллическую структуру, характеризующуюся пониженной текучестью (или повышенной вязкостью) или высокой плотностью. Мазуты содержат значительное количество асфальто-смолистых веществ; более высокое количество, чем исходные нефти, серы, ванадия и азота. Минеральные примеси в мазутах представляют собой в основном соли щелочных металлов, растворенные в воде, извлеченной из пластов вместе с нефтью, а также продукты коррозии резервуаров.

Зольность топочных мазутов весьма невелика и обычно не превышает 0,2%. С повышением вязкости мазута его зольность увеличивается, что связано с углублением отбора от нефти легких малозольных фракций. В состав золы мазутов входят окислы кальция, магния, ванадия, натрия, железа, кремния и др.

Угли представляют собой твердые ископаемые топлива и состоят из органической и минеральной части. Органическая масса угля имеет сложную структуру и состоит из молекул различных групп соединений (кислородсодержащих, серосодержащих, азотсодержащих, углеводородов). Основными компонентами минеральной части твердых горючих ископаемых являются карбонаты, сульфиды и глинистый материал.

Содержание воды в мазутах обычно составляет от 0,5 до 5%, однако в отдельных случаях ее содержание может достигать 10–20% и более. Значительное обводнение мазутов происходит в основном при разогреве паров во время слива.

Влажность угля колеблется от 4–5 до 50–55% и обусловлена наличием физически и химически связанной влаги, содержание которой зависит от степени метаморфизма и условий залегания.

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 электростанции и в котельные поступают сернистые и высокосернистые мазуты. Содержание серы в углях изменяется от 0,5 до 15% для различных месторождений.

Таким образом, анализируя состав полученных смесей мазута и угля, можно отметить, что, несмотря на наличие одних и тех же элементов, состав существенно изменяется, и если по сернистости происходит некоторое улучшение показателей за счет более низкого содержания серы в Кузнецком тощем угле, то по всем остальным показателям – ухудшение. В частности зольность превышает установленные ГОСТ 10585–2013 [5] требования.

Реологические свойства мазутоугольных топлив

Добавка небольшого количества мелкодисперсной угольной пыли существенно изменяет важнейшие свойства, например реологические. Авторами были проведены экспериментальные исследования реологических свойств на установке с использованием ротационного вискозиметра RM100. Были приготовлены образцы суспензии с частицами угольной пыли диаметром 0,05-0,063 мм, полученными в результате рассева на вибростенде. Массовое содержание угольной пыли изменялось от 2 до 20%. Измерения проводились в диапазоне скоростей сдвига от 2 до 300 с^{-1} при температуре 55 °С. После статистической обработки определялись средние значения трех измерений, результаты показаны на рисунке.

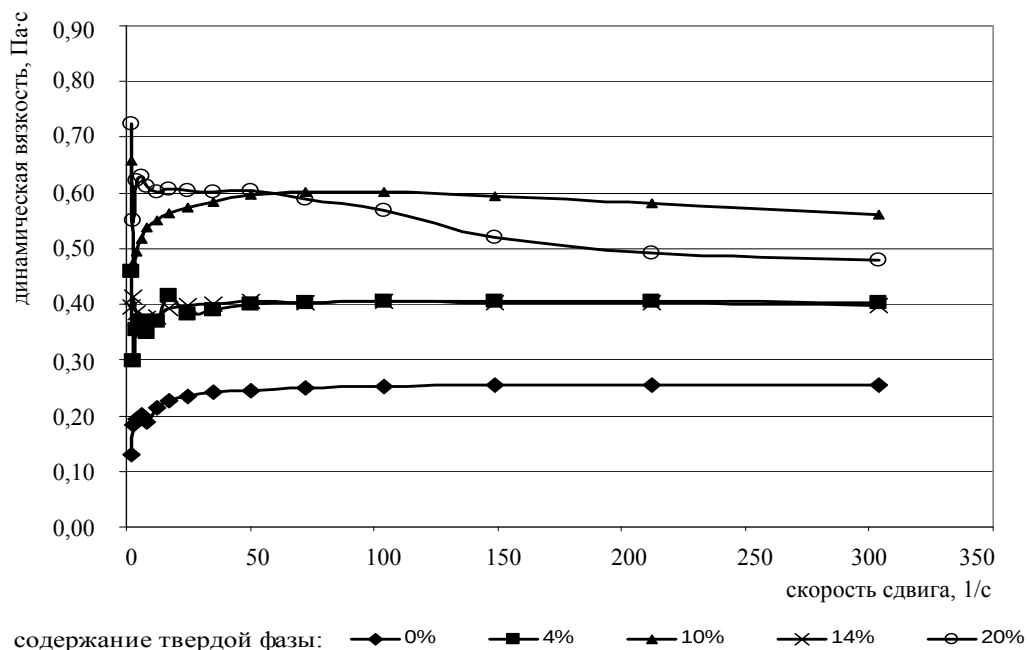


Рис. Зависимость динамической вязкости мазутоугольного топлива от скорости сдвига при различном содержании угольной пыли

Полученные экспериментальные зависимости вязкости от скорости сдвига свидетельствуют о проявлении неньютоновских свойств у мазутоугольных суспензий. Наиболее ярко это выражено для суспензии с 20% массовым содержанием угольной пыли, поскольку происходит существенное снижение динамической вязкости при скорости сдвига более 50 с^{-1} .

Для формирования расчетных зависимостей необходима обработка экспериментальных данных на основе существующих моделей. В качестве теоретических моделей для описания полученных экспериментальных значений были выбраны модель Карро и Освальда-де Вале, которые представляют собой

полуэмпирические зависимости динамической вязкости от скорости сдвига и содержат коэффициенты, учитывающие специфику исследуемой среды [6].

Согласно модели Карро зависимость эффективной вязкости от скорости сдвига выглядит следующим образом:

$$\mu_{eff}(\dot{\gamma}) = \mu_{inf} + (\mu_0 + \mu_{inf})(1 + (\lambda\dot{\gamma})^2)^{\frac{n-1}{2}}, \quad (1)$$

где μ_{inf} , μ_0 , λ и n – коэффициенты, зависящие от свойств среды; μ_0 – вязкость при нулевой скорости сдвига, Па·с; μ_{inf} – вязкость при бесконечной скорости сдвига, Па·с; λ – время релаксации, с; n – степенной показатель.

В промежуточной области скоростей сдвига для зависимости $\sigma(\dot{\gamma})$ выполняется степенной закон. Именно эта область представляет наибольший практический интерес и описывается в следующей форме согласно модели Освальда-де Вале [6]:

$$\eta = \frac{\sigma}{\dot{\gamma}} = k\dot{\gamma}^{n-1}, \quad (2)$$

где k и n – эмпирические параметры; $\dot{\gamma}$ – скорость сдвига.

Результаты экспериментов и расчетные данные по моделям Карро и Освальда-де Вале представлены в табл. 2.

В целом модель Освальда-де Вале лучше описывает экспериментальные данные при значениях скоростей сдвига, приведенных в табл. 2. Средняя относительная погрешность для модели Освальда-де Вале составила 2,9%, тогда как для модели Карро – 47,3%.

Коэффициенты в уравнении (2), определены графическим методом и представлены в табл. 3.

Таблица 2

Экспериментальные и расчетные значения динамической вязкости
мазутаугольных топлив при различных скоростях сдвига

Содержание угля, % (масс.)	Динамическая вязкость при скоростях сдвига, Па·с								
	8,43 с ⁻¹			12,1 с ⁻¹			17,5 с ⁻¹		
	Э*	Расчет по урав-нению		Э*	Расчет по урав-нению		Э*	Расчет по урав-нению	
		(1)	(2)		(1)	(2)		(1)	(2)
4	0,35	0,68	0,39	0,37	0,64	0,40	0,42	0,61	0,41
10	0,54	0,58	0,53	0,55	0,52	0,55	0,56	0,48	0,54
14	0,38	0,70	0,39	0,38	0,67	0,39	0,39	0,64	0,39
20	0,61	0,44	0,61	0,60	0,42	0,60	0,61	0,41	0,59

* - экспериментальные данные авторов

Таблица 3

Эмпирические коэффициенты для расчета динамической вязкости по уравнению (2)

Коэффициент	Содержание угля, % (масс.)			
	4	10	14	20
K	0,356	0,484	0,384	0,660
n	1,047	1,041	1,008	0,959

На основе измеренных и обработанных значений динамической вязкости с учетом плотности мазутоугольных суспензий при температуре 55 °С были рассчитаны значения кинематической вязкости (табл. 4).

Таблица 4

Плотность и кинематическая вязкость мазутоугольных топлив

Содержание угля, % (масс.)	Плотность, кг/м ³	Кинематическая вязкость при скоростях сдвига, мм ² /с		
		8,43 с ⁻¹	12,1 с ⁻¹	17,5 с ⁻¹
4	928,6	443	449	457
10	950,2	593	602	611
14	965,2	439	440	442
20	988,5	680	670	660

Теплофизические свойства мазутоугольных топлив

Наиболее важными теплофизическими свойствами мазутоугольных топлив являются теплоемкость и теплопроводность, которые также зависят от свойств составляющих компонентов – мазута и угля.

Теплоемкость мазута в диапазоне температур 20–100 °С составляет 1,85–2,0 кДж/(кг·К), несколько повышается при увеличении температуры t и может быть рассчитана по различным зависимостям для соответствующих значений плотности. Поскольку плотность мазутоугольных топлив незначительно отличается от плотности мазута, то для определения удельной теплоемкости мазута М100 и суспензий, приготовленных на его основе, можно использовать формулу, рекомендованную Всероссийским теплотехническим институтом (ВТИ) [4]:

$$c_{pm} = 1738 + 2,5t$$

или формулу Н.М. Михайлова для расчета теплоемкости мазута любой марки:

$$c_t = 2018 + 3,2(t - 100).$$

Удельная теплоемкость твердого топлива зависит от значений теплоемкостей ее составных частей: органической массы, минеральных примесей и влаги.

Средние значения теплоемкости при температурах до 200 °С с достаточной точностью могут быть определены для угольной пыли по формуле [7], кДж/(кг · °С):

$$c_{пл} = \frac{W^{пл}}{100} + \frac{100 - W^{пл}}{100} c_{тл}^c,$$

где $c_{тл}^c$ – теплоемкость сухой массы топлива, кДж/(кг · °С). Значение этой величины может быть принято: для антрацитов и тощих углей – 0,92; для каменных углей – 1,09; для бурых углей и фрезерного торфа – 1,13 кДж/(кг · °С).

Теплопроводность мазута при стандартных условиях находится в пределах 0,12–0,16 Вт/(м·К) и также зависит от температуры и снижается с ее увеличением. Для определения теплопроводности мазута марки М100 рекомендуется использовать следующую формулу [4]:

$$\lambda_m = 0,158 - 0,0002093(t - 20).$$

Теплопроводность твердого топлива определяется на основании анализа теплопроводности его составных частей: твердой, газовой и жидкой фаз. Кроме того, учитывается конвекция в газовой фазе и теплообмен излучением.

Итоговой характеристикой теплопроводности является эффективный коэффициент теплопроводности λ_3 , который можно представить в виде суммы основных составляющих:

$$\lambda_3 = \lambda_T + \lambda_G + \lambda_{\text{л}} + \lambda_{\text{вп}},$$

где λ_T – коэффициент теплопроводности твердой фазы (вносит небольшой вклад из-за наличия в слое топлива газовых включений); λ_G – коэффициент теплопроводности газовой фазы (является определяющим фактором из-за непрерывности газовой фазы в слое топлива); $\lambda_{\text{л}}$ – условный коэффициент лучистой теплопроводности (является значимым при температурах выше 700–800 °С); $\lambda_{\text{вп}}$ – коэффициент теплопередачи вследствие термовлагопроводности (характеризует процесс движения влаги в слое топлива).

На теплопроводность твердого топлива оказывают влияние его плотность, влажность и температура. Влияние плотности на теплопроводность различных углей представлено в работе [8]. Влияние температуры на теплопроводность можно выразить зависимостью

$$\lambda_3 = \lambda_{t_0} [1 + \gamma(t - t_0)],$$

где t_0 – температура начала интервала; λ_{t_0} – соответствующий этой температуре коэффициент теплопроводности; γ – температурный коэффициент, значения которого определены по справочным данным и для температуры 55 °С и угля, находящегося в слое, составляет $\gamma=0,002$.

Коэффициент теплопроводности суспензий определяется по формуле

$$\lambda = \lambda_{\text{ж}} \frac{2\lambda_{\text{ж}} + \lambda_{\text{ТВ}} - 2\varphi(\lambda_{\text{ж}} - \lambda_{\text{ТВ}})}{2\lambda_{\text{ж}} + \lambda_{\text{ТВ}} + \varphi(\lambda_{\text{ж}} - \lambda_{\text{ТВ}})},$$

где $\lambda_{\text{ж}}$ – теплопроводность жидкой фазы (мазута), Вт/(м·К); $\lambda_{\text{ТВ}}$ – теплопроводность твердой фазы (угля).

Рассчитанные по формулам значения теплопроводности и теплоемкости мазутоугольных топлив при температуре 55 °С приведены в табл. 5.

Таблица 5

Теплоемкость и теплопроводность мазутоугольных топлив

Содержание угля, % (масс.)	Теплопроводность, Вт/(м·К).	Теплоемкость, кДж/кг·°С	
		по ВТИ	по Михайлову
4%	0,142	1,738	1,698
10%	0,149	1,738	1,698
14%	0,153	1,738	1,698
20%	0,160	1,738	1,699

Закключение

Анализ расчетных и экспериментальных значений состава и основных реологических и теплофизических свойств мазутоугольных топлив показывает возможность их использования в качестве котельного топлива по таким показателям, как содержание серы и основных компонентов органической массы. Однако многие показатели качества мазута М100 ГОСТ 10585-75 не регламентируются, поэтому свойства и показатели качества мазутоугольных топлив должны определяться исходя из условий их использования в энергетических и транспортных установках. Например, зольность мазутоугольного топлива существенно превышает нормативные показатели,

что при использовании в качестве котельного топлива потребует установки золоуловителей.

Полученные зависимости для определения динамической вязкости и теплофизических свойств мазутоугольных топлив могут использоваться при расчете гидродинамических параметров при движении в трубопроводах и каналах энергетических установок и теплообменных аппаратов при использовании мазутоугольных топлив на тепловых электростанциях, в промышленных котельных и транспортных установках.

Summary

In article the results of theoretical and experimental researches of composition, rheological and thermophysical properties of mazut coal fuels, based on mazut M100 type u Kuznetsk lean coal are presented. Dependencies to determine dynamic viscosity at different shear rates and mass content of coal dust are obtained. Heat capacity values and thermal conductivity of mazut coal fuels are shown. The obtained results can be used at hydrodynamic parameters calculation during moving in the pipes and heat-exchange apparatus and also using the mazut coal fuels on power and transport plants.

Keywords: *mazut coal fuel, dynamic viscosity, heat capacity, thermal conductivity.*

Литература

1. Титов Е.В. Получение и использование в энергетике экологически чистых видов альтернативных топлив на основе эмульсий и суспензий / Е.В. Титов, С.Л. Хилько. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://nich.dgtu.donetsk.ua/konf/konf4/sek_06_him/s06_23.pdf.
2. Грехов Л.В. Исследование и проблемы создания дизельного двигателя на угольных суспензиях / Л.В. Грехов // Безопасность в техносфере. 2007. №5. С.33-36.
3. Возницкий И.В. Практика использования морских топлив на судах / И.В. Возницкий. С.-Пб., 2005. 124 с.
4. Назмеев Ю.Г. Мазутные хозяйства ТЭС / Ю.Г. Назмеев. М.: Издательство МЭИ, 2002. 612 с.
5. ГОСТ 10585–2013. Топливо нефтяное. Мазут. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2014. 12 с.
6. Малкин А.Я. Реология: концепции, методы, приложения / А.Я. Малкин, А.И. Исаев. Пер. с англ. СПб.: Профессия, 2007. 560 с.
7. Расчет и проектирование пылеприготовительных установок котельных агрегатов. М.-Л.: ЦКТИ, 1971. 220 с.
8. Михайлов Н.М. Вопросы сушки топлива на электростанциях / Н.М. Михайлов. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1957. 152 с.

Поступила в редакцию

26 марта 2015 г.

Вафин Артем Ринатович – аспирант Федерального государственного бюджетного учреждения науки Казанский научный центр Российской академии наук. Тел: 8(843)273-05-71. E-mail: asdvafin@gmail.com.

Мингалева Гузель Рашидовна – д-р техн. наук, заведующая лабораторией «Моделирование систем производства энергии» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Казанский научный центр Российской академии наук. Тел: 8(843)273-05-71. E-mail: mingaleeva-gr@mail.ru.