

Институт нефтехимического синтеза  
имени А. В. Топчиева РАН

Московский государственный университет  
имени М.В. Ломоносова

Реологическое общество имени Г.В. Виноградова

V конференция молодых  
учёных



РЕОЛОГИЯ  
И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ  
МЕХАНИКА  
ГЕТЕРОФАЗНЫХ СИСТЕМ

19—20 июня 2017 года  
Москва

УДК 52 134:541.186/6

В сборнике помещены программа и тексты докладов V конференции молодых ученых «Реология и физико-химическая механика гетерофазных систем».

Тематика докладов охватывает широкий круг актуальных проблем реологии полимеров, дисперсных, медицинских и пищевых сред, а также физико-химической механики гетерофазных систем. Сборник представляет интерес для научных работников, студентов высших учебных заведений, аспирантов, врачей-практиков, инженерно-технического персонала, связанного с формированием полимерных материалов, композитов и производством пищевых продуктов.

Доклады публикуются в авторской редакции.

### СВЕДЕНИЯ О КОНФЕРЕНЦИИ

#### ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

В.Г. Куличихин (председатель), Н.М. Задымова, Л.И. Иванова, Ф.А. Куликов-Костюшко, А.Я. Малкин, В.Г. Сергеев, З.Н. Скворцова, В.Ю. Траскин, Н.Б. Урьев, Э.И. Френкин.

#### МЕСТО ПРОВЕДЕНИЯ И РЕГЛАМЕНТ

Конференция проводится по адресу: Москва, Ленинский проспект, дом 29, Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН.

Открытие конференции — в 9:30 19 июня 2017 года.

Все выступления устные.

На лекции выделяется 30 минут, на доклады — не более 15 минут, включая ответы на вопросы.

ISBN 978-5-9905815-6-2



9 785990 581562

Компьютерная вёрстка:  
Ф.А. Куликов-Костюшко

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Зверева Э.Р., Мингалеева Г.Р., Хабибуллина Р.В., Ахметвалиева Г.Р. // Нефтехимия. 2016. Т. 56. № 1. С. 73-75.
2. Zvereva E.R. Zueva O.S., Khabibullina R.V. //Materials Science Forum. 2016. Vol. 870. P. 666–670.
3. Зверева Э.Р., Зуева О.С., Хабибуллина Р.В., Мингалеева Г.Р., Ахметвалиева Г.Р., Салихзянова Д.Р., Хатмуллина З.Ф. //Химия и технология топлив и масел. 2016. № 5. С. 15–19.
4. Зверева Э.Р., Зуева О.С., Хабибуллина Р.В., Хатмуллина З.Ф., Дремичева Е.С. // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2016. № 1–2. С. 28–36.
5. Зверева Э.Р., Зуева О.С., Дремичева Е.С., Хабибуллина Р.В., Идиятуллин Б.З., Макарова А.О., Ахметвалиева Г.Р., Салихзянова Д.Р., Хатмуллина З.Ф. Улучшение эксплуатационных и экологических характеристик жидких органических котельных топлив добавками, включающими углеродные нанотрубки // Отчет за 2016 г. по гранту РФФИ № 16-08-00731. 81 с.
6. Зверева Э.Р., Зуева О.С., Хабибуллина Р.В. Влияние углеродных наноматериалов на реологические характеристики гетерогенных систем / Сборник статей XXIII Всерос. конф. «Структура и динамика молекулярных систем» — Москва: ИФХЭ РАН, 2016. С. 279-288
7. Zvereva E.R. Zueva O.S., Khabibullina R.V., Makarova A.O. // Journal of Engineering and Applied Sciences. 2016. Vol. 11. P. 2950-2954.

### **Улучшение реологических свойств водоугольных суспензий при добавлении углеродных нанотрубок**

Г.Р. Ахметвалиева<sup>1</sup>, Э.Р. Зверева<sup>1</sup>, А.О. Макарова<sup>1</sup>, Д.В.Ермолаев<sup>2</sup>,  
Ю.К. Монгуш<sup>1</sup>, О.С. Зуева<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> Исследовательский центр проблем энергетики КазНЦ РАН,  
Казань, Россия

gu\_94@mail.ru

Промышленные запасы угля значительно больше и равномернее распространены по земному шару, чем совокупные запасы нефти и газа, а в энергетическом эквиваленте многократно их превосходят. Именно поэтому в последние годы в России и в других странах возрос интерес к использованию в малой и средней энергетике угля и приготовленного на его основе водоугольного топлива (ВУТ) — жидкого композиционного топлива на основе измельченного угля и воды. К преимуществам водоугольного топлива следует отнести экологическую безопасность, а также пожаро- и взрывобезопасность на всех стадиях его производства, транспортирования и использования; снижение вредных выбросов в ат-

мосферу. Основной проблемой при использовании ВУТ является высокая вязкость суспензии при необходимой концентрации измельченного угля [1]. Разработка методов управления вязкостными характеристиками за счет изменения состава ВУТ является весьма актуальной задачей [2–5]. Целью данного исследования явилось изучение влияния на вязкостные свойства ВУТ добавок углеродного наноматериала.

В качестве добавок были использованы многостенные углеродные нанотрубки (УНТ) углеродного наноматериала «Таунит» (<http://www.nanotc.ru>), диспергированные в водной дисперсии додецилсульфата натрия (ДСН, анионный ПАВ) с концентрацией 100 мМ и в дипроксамине (хорошо растворимый в маслах неионогенный ПАВ, <http://www.kazanorgsintez.ru>). Выбор указанных ПАВ диктовался их распространенностью и имеющимся у авторов опытом работы с ними [6–8]. Предварительные опыты по исследованию реологических свойств ВУТ с добавлением нанотрубок заставили нас отказаться от использования дипроксамина, который давал неплохие результаты в случае топливных мазутов, но достаточно сильно увеличивал вязкость ВУТ [2,3,9]. Напротив, добавление УНТ, диспергированных в водных дисперсиях ДСН привело к замечательным результатам, приведенным на рис. 1, слева, где наблюдалось снижение динамической вязкости ВУТ примерно в 2 раза. К сожалению, наблюдаемые для ВУТ результаты очень сильно зависят не только от концентрации наночастиц и среды их диспергирования, но и от химического и фракционного состава угольной пыли топливной суспензии, и поэтому не всегда могут быть воспроизводимыми. В данной работе мы попытались изучить зависимость вязкости ВУТ от концентрации наночастиц УНТ для образцов ВУТ, различающихся своим фракционным составом.

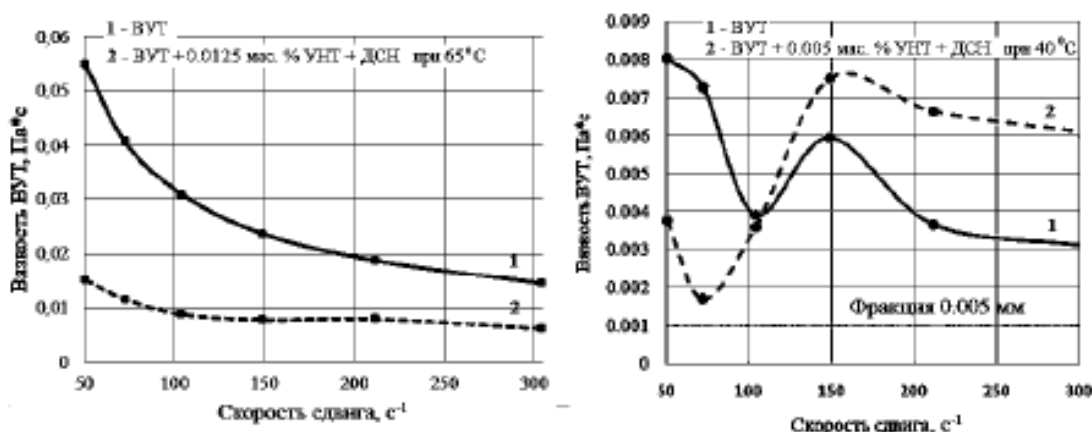


Рис. 1. Динамическая вязкость образцов ВУТ в зависимости от скорости сдвига в присутствии углеродных нанотрубок и без них. Слева: ВУТ без разделения на фракции при 65 °С; справа: ВУТ, приготовленное на основе фракции частиц угля размером 0.005 мм при 40 °С

Пробы водоугольного топлива были сделаны на основе тощего угля Кузнецкого месторождения. Приготовление образцов водоугольной суспензии проводилось следующим образом: дробленый уголь из бункера направлялся на измельчение в вибрационную мельницу. Из полученной угольной пыли были взяты пробы, которые подвергались ситовому анализу на виброустановке и последующему фракционированию. Частицы с определенными размерами взвешивались и подавались в смеситель, в который дозировалась дистиллированная вода из мерной емкости и готовилась водоугольная суспензия путем перемешивания компонентов. В данной работе были изучены водоугольные суспензии с размерами частиц угля 0.05 мм и 0.005 мм. Доля угля в суспензии составляла 30%. Концентрация углеродного наноматериала в суспензии варьировалась от нуля до 0.0125 мас. %.

Исследование концентрационных зависимостей условной вязкости при различных температурах (рис. 2), проведенное на вискозиметре Энглера ВУ-М-ПХП позволило в некоторой степени изучить особенности структурообразования, происходящего в присутствии наночастиц и выявить наиболее оптимальные концентрации углеродного наноматериала, при которых снижение условной вязкости будет наибольшим. Выяснилось, что в случае обеих исследованных фракций в диапазоне рассмотренных температур минимум условной вязкости наблюдается вблизи концентрации 0.005 мас. % УНТ.

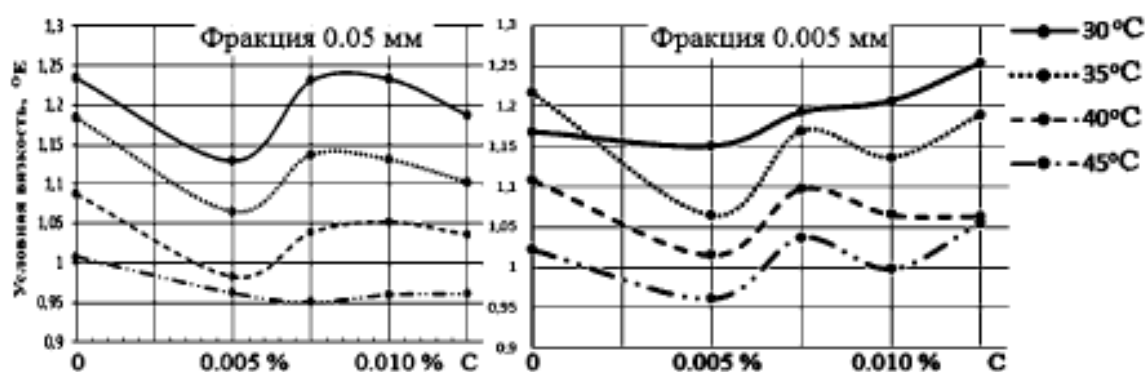


Рис. 2. Зависимость условной вязкости проб ВУТ, приготовленных на основе фракций частиц угля с размерами 0.05 мм и 0.005 мм от концентрации УНТ для температур 30 °С, 35 °С, 40 °С, 45 °С

Поскольку основной задачей является снижение вязкости ВУТ при его прохождении по трубопроводам, нами также была исследована динамическая вязкость образцов приготовленных водоугольных суспензий при различных скоростях сдвига с помощью ротационного вискозиметра Rheomat RM 100. Измерения вязкости водоугольного топлива производились при тех же температурах (30 °С, 35 °С, 40 °С и 45 °С) и

различных скоростях сдвига до  $300 \text{ с}^{-1}$ . Работа вискозиметра управлялась с персонального компьютера через программное обеспечение VISCO-RM SOFT. Результаты экспериментов для одного из образцов (фракция 0.005 мм, температура  $40^\circ\text{C}$ ) представлены на рис. 1, справа. Зависимость динамической вязкости от скорости сдвига для других образцов при других температурах имеет примерно такой же характер. Наблюдалось значительное снижение вязкости на малых скоростях сдвига (особенно до  $70 \text{ с}^{-1}$ ), далее вязкость образцов с нанотрубками начинает расти, но вплоть до скорости  $100 \text{ с}^{-1}$  она все же остается меньшей, чем вязкость чистого БУТ, а затем наблюдается заметное увеличение динамической вязкости примерно до  $150 \text{ с}^{-1}$ , а потом опять наблюдается снижение вязкости по мере увеличения скорости течения жидкости. Такое поведение указывает на возникновение дополнительного структурообразования во всем объеме образца, которое наблюдается как в отсутствие УНТ, так и при их наличии, на что указывает то, что на рис. 1, справа, кривые 1 и 2 имеют принципиально одинаковый характер. Однако следует отметить, что наличие углеродных нанотрубок ускоряет процесс структурообразования, на что указывает смещение минимума в область меньших скоростей сдвига.

В целом, предложенная ранее и развитая нами концепция образования гетеросфер [9], на наш взгляд, позволяет в значительной степени объяснить anomальное реологическое поведение многокомпонентных систем в присутствии наночастиц. В рамках этого представления наночастицы выступают в роли структурообразующих центров, вокруг которых под действием избыточной поверхностной энергии наночастиц образуются упорядоченные слои компонентов материала матрицы, т.е. возникают надмолекулярные образования. При малых концентрациях наночастиц упорядоченные (и, вероятно, более плотные) образования, размер которых обуславливается как дисперсионной средой, так и видом наночастиц и может достигать до 1 мкм, на вязкость среды не влияют. В этом случае вязкость по-прежнему определяется дисперсионной средой. Увеличение концентрации наночастиц приводит к почти полному структурированию в объеме образца, при которой гетеросферы становятся разделенными тонкими прослойками менее плотной части дисперсионной среды. При этом плоскость скольжения от приложенной деформации будет приходиться, в основном, именно на эту прослойку, приводя к возникновению послойного сдвигового течения. Последующее увеличение концентрации наночастиц приводит к сцеплению гетеросфер и увеличению вязкости до первоначальных, а в некоторых случаях и до больших значений.

Воздействие напряжения сдвига при исследовании динамической вязкости в области сцепления гетеросфер должно приводить сначала к частичному разрушению гетеросфер, а при больших скоростях сдвига

— к их полному разрушению. Этот процесс должен сопровождаться уменьшением вязкости. Несмотря на то, что анизотропная форма наночастиц (в первую очередь это касается УНТ, длина которых в наших образцах в среднем варьирует от 50 до 500 нм при среднем диаметре нанотрубок 15—20 нм [6]) может приводить к образованиям не идеально сферической формы, возможен разворот надмолекулярных образований и их ориентация в направлении действия сил, что не мешает послойному сдвиговому течению.

Таким образом, проведенные исследования вязкости образцов ВУТ показали возможность значительного уменьшения вязкости ВУТ при малых скоростях сдвига (до  $100 \text{ с}^{-1}$ ) при введении присадки — углеродного наноматериала в концентрации 0.005 мас. %.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-08-00731-а).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Наноматериалы и нанотехнологии в энергетике / Под редакцией Шамсутдинова Е.В. и Зуевой О.С. — Казань, изд-во Каз. гос. энерг. ун-та. В 2 томах.
2. Zvereva E.R., et al. // *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2016. Vol. 11. P. 2950–2954.
3. Zvereva E.R., et al. // *IJPT*. 2016. Vol. 8 (4). P. 26744–26752.
4. Zvereva E.R., et al. // *Material Science Forum*. 2016. Vol. 870. P. 666–670.
5. Зверева Э.Р. и др. // *Химия и технология топлив и масел*. 2016. № 5 (597). С. 15–19.
6. Губайдуллин А.Т. и др. // *Известия АН. Сер. химическая*. 2016. № 1. С. 158–166.
7. A.O. Borovskaya, B.Z. Idiatullin, O.S. Zueva // *J. Phys. Conf. Ser.*, 2016. Vol. 690. № 012030.
8. Зуева О.С. и др. // *Известия Академии наук. Серия химическая*. 2016. № 5. С. 1–7.
9. Зверева Э.Р., Зуева О.С., Хабибуллина Р.В. Влияние углеродных наноматериалов на реологические характеристики гетерогенных систем / *Сборник статей XXIII Всерос. конф. «Структура и динамика молекулярных систем»* — Москва: ИФХЭ РАН, 2016. С. 279–288.

## Влияние реологических добавок различной природы на текучесть расплавов полисульфона

А.Б. Баранов, И.Д. Симонов-Емельянов

Московский технологический университет (Институт тонких  
химических технологий), Москва, Россия

qsefdesx@gmail.com

В настоящее время широко используются теплостойкие полимерные материалы на основе полисульфона. Обладая высокими теплофизическими, диэлектрическими и физико-механическими свойствами их используют в электротехнике, медицине и машиностроении. Одна из