

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, МАТЕРИАЛЫ  
И ОБОРУДОВАНИЕ В ЭНЕРГЕТИКЕ

В трех томах

Том II

ИННОВАЦИОННЫЕ РЕШЕНИЯ И НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Монография

*Под общей редакцией  
Э.Ю. Абдуллазянова, Э.В. Шамсутдинова*

Казань 2018

УДК 620.9  
ББК 31  
Н76

Рецензенты:

А.А. Калачев, д-р физ.-мат. наук, проф. РАН (КФТИ им. Е.К. Завойского КазНЦ РАН);  
А.А. Карасик, д-р хим. наук, проф. (ИОФХ им. Арбузова ФИЦ КазНЦ РАН);  
А.А. Лопатин, канд. техн. наук, доц.  
(Институт авиации, наземного транспорта и энергетики КНИТУ-КАИ)

Н76 Новые технологии, материалы и оборудование в энергетике. В 3 т.  
Т. II. Инновационные решения и новые материалы: монография / под общ. ред.  
Э.Ю. Абдуллазянова, Э.В. Шамсутдинова. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2018. –  
422 с.

ISBN 978-5-89873-534-0 (т. 2)

ISBN 978-5-89873-532-6

В коллективной монографии «Новые технологии, материалы и оборудование в энергетике», посвященной 50-летию юбилею Казанского государственного энергетического университета, представлены результаты научных разработок, касающихся создания и использования новых технологий и оборудования в энергетике, а также рассмотрены вопросы совершенствования и применения в энергетической отрасли материалов с улучшенными эксплуатационными и экологическими характеристиками. Наряду с оригинальными разработками преподавателей КГЭУ в монографии представлены работы ряда ведущих отечественных и иностранных ученых.

Второй том монографии посвящен вопросам создания новых материалов для традиционной и возобновляемой энергетики, создания и использования инновационных решений и технологий при генерации, транспортировке и распределении тепловой и электрической энергии, а также эксплуатации теплообменного и иного оборудования на промышленных объектах.

Монография предназначена студентам старших курсов, магистрантам, аспирантам, научно-педагогическим работникам, а также работникам топливно-энергетического комплекса.

УДК 620.9

ББК 31

Авторы: С.Я. Алибеков, Н.К. Андреев, Е.П. Афанасьев, Г.Р. Ахметвалиева,  
Р.Т. Ахметгаряев, Н.У. Брукс, А.Н. Гавриленко, В.А. Геворкян,  
П.П. Гладышев, М.П. Горячев, М.Р. Джебрил, Ф.Ф. Динмухаметов,  
В.А. Довыденков, И.Р. Додов, Д.В. Ермолаев, А.Н. Закиров, Э.Р. Зверева,  
О.С. Зуева, Д.А. Иванов, В.Р. Иванова, В.К. Ильин, О.В. Ильин,  
И.С. Ислентьев, В.И. Капаев, О.В. Козелков, Б.В. Корзун, А.Г. Лаптев,  
Е.А. Лаптева, Т.В. Лопухова, А.О. Макарова, С.М. Маргулис, В.Л. Матухин,  
А. Мойя-Полл, Ю.К. Монгуш, А.М. Моржухин, С.В. Моржухина,  
Н.И. Москаленко, Н.С. Мочалов, Ф.Ф. Муллин, Р.Г. Назмитдинов,  
Н.В. Роженцова, О.С. Сироткин, Р.О. Сироткин, В.Р. Соболев, А.В. Танеева,  
А.Е. Усачев, Т.М. Фарахов, Р.В. Хабибуллина, А.И. Хайбуллина,  
М.С. Хамидуллина, Е.В. Шмидт, Д.М. Юдицкий, М.В. Ярмолык

ISBN 978-5-89873-534-0 (т. 2)

ISBN 978-5-89873-532-6

© Авторы, 2018

© Казанский государственный  
энергетический университет, 2018

# ИЗМЕНЕНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЖИДКИХ ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ, В ТОМ ЧИСЛЕ УГЛЕВОДОРОДНОГО ТОПЛИВА, В ПРИСУТСТВИИ НАНОМАТЕРИАЛОВ

Э.Р. Зверева, О.С. Зуева, Г.Р. Ахметвалиева,  
А.О. Макарова, Ю.К. Монгуш

## Введение

В последние годы было отмечено существенное влияние малых добавок наночастиц любой природы на физико-химические свойства различных гетерогенных систем, находящихся в жидком состоянии. В частности, имеются данные о воздействии наночастиц на вязкостные характеристики углеводородного топлива [1–5], битумов [6,7], низкомолекулярных жидкостей и масел [8–10], цементных растворов [11], дисперсий на основе эпоксидных олигомеров [12], растворов и расплавов полимеров [13–18]. Нами был проведен анализ литературных данных, в которых были изучены особенности поведения вязкости растворов и расплавов гетерогенных систем различного состава в присутствии наночастиц. Результаты были обобщены в работах [19, 20] и доложены в пленарном докладе на конференции во Вьетнаме [21].

Вязкость является чрезвычайно важным эксплуатационным параметром, обуславливающим ход протекания различных технологических процессов. Снижение вязкости во многих случаях приводит к облегчению технологических стадий использования рассматриваемых материалов, а увеличение вязкости может говорить об упрочняющем модифицировании материалов наноразмерными частицами. В частности, уменьшение вязкости жидкого котельного топлива (топливного мазута, водотопливных эмульсий и водоугольных суспензий) приводит к снижению энергетических затрат при его перекачке по трубопроводам, разгрузке из цистерн и подаче в котел и поэтому имеет принципиальное значение в целях энергосбережения.

Уникальные особенности наноструктур позволяют использовать их в разнообразных инновационных приложениях, стимулируя интенсивное развитие нанотехнологий. Особая привлекательность нанотехнологий связана с возможностью управления свойствами наноструктур и их окружения за счет проявления квантово-размерных эффектов, т.е. за счет использования зависимости свойств наноструктур от их размера и формы. Добавление наноструктур приводит

к радикальной трансформации свойств традиционных материалов практически без изменения их химического состава. Кроме существования квантово-размерного эффекта следует отметить склонность ансамблей наночастиц к самоорганизации и самосборке, приводящую к появлению упорядоченных структур и изменению функциональных характеристик исходных материалов. Явления самосборки и самоупорядочения атомов и молекул характерны для живой природы и лежат в основе роста биологических организмов. Использование подобных механизмов в технологических процессах может приводить к снижению материалоемкости, энергоемкости, трудоемкости и себестоимости продукции и даже стать основой для безотходного производства самых разнообразных изделий в промышленных масштабах.

### Общая теория

Как уже было отмечено, для улучшения реологических свойств жидких гетерогенных систем, к которым относятся различные виды углеводородного топлива, в том числе топливные мазуты, могут быть использованы малые добавки наночастиц любой природы, в том числе углеродные нанотрубки [12–14, 22–26]. Изучение оптической плотности дисперсий, дающее информацию о процессах агрегирования, позволило сделать вывод о том, что в изучаемой области концентраций в жидкости вокруг наночастиц формируется область седиментационно устойчивых надмолекулярных наноразмерных (100–200 нм) структурных образований [12]. Течение жидких гетерогенных систем при наличии такого рода образований может происходить с разделением на отличающиеся по вязкости слои, т.е. возникать послойное сдвиговое течение.

Дополнительное структурообразование и снижение вязкости до 1,5 раз наблюдалось в растворах полиакрилонитрила [27]. Изменение вязкости при добавлении наночастиц отмечено и для различных продуктов нефтепереработки. Снижение вязкости, наблюдавшееся для дизельного топлива с присадками наночастиц [1], в том числе углеродных нанотрубок, приобретает особую важность для тяжелого котельного топлива, поскольку может дать ощутимый экономический эффект. Уменьшение вязкости топливных мазутов, обеспечивая их лучшую прокачиваемость по трубопроводам, позволяет снизить на стадии подготовки к сжиганию интенсивность его нагрева и,

тем самым, уменьшить энергетические затраты на его подогрев. В работах [2–5, 28] было показано, что добавление углеродного наноматериала «Таунит», а также обезвоженного карбонатного шлама водоподготовки ТЭС, обладающего разнообразным химическим составом, высокой дисперсностью и поверхностной активностью, при концентрации присадки в мазуте близкой к 0,5 масс. % приводит к уменьшению вязкости на 7–25 %, что дает повышение энергоэффективности и экономию топлива.

Реологические свойства других продуктов нефтепереработки – нефтяных битумов и нефтяных масел, а также возможности их модифицирования углеродными наноразмерными структурами с целью улучшения эксплуатационных свойств были рассмотрены во многих статьях, в частности в [7–10]. Следует отметить, что возникновение упрочняющего действия модифицированных битумов, используемых в производстве асфальтобетонов, связано не со снижением, а с повышением их вязкостных свойств (относительно минимума). Отметим, что во всех вышеупомянутых работах отмечается появление в жидкости надмолекулярных наноразмерных структурных образований, размеры которых оцениваются в 100–1000 нм, приводящих к изменению реологических свойств жидкостей.

Аналогичные явления наблюдались в процессе наномодифицирования строительных смесей, где добавление углеродных наноструктур (фуллеренов, углеродных нанотрубок, аморфного углерода) способствовало, по мнению авторов [11], формированию фрактальных перколяционных сеток и определенному структурообразованию воды, обеспечивая изменение морфологии раствора. Наноструктурирование воды затворения наномодификатором на основе углеродных наноструктур приводило к снижению вязкости цементного теста в 1,4–1,7 раза.

Для объяснения эффектов, наблюдавшихся в гетерогенных системах, были предложены различные механизмы снижения вязкости, объяснявшие изменение морфологии композита и переход к стратифицированному (послойному) течению [15, 16]. В частности, была выдвинута гипотеза о самопроизвольном самоупорядочении атомов вокруг наночастиц в жидких дисперсных системах, приводящих к дополнительному надмолекулярному структурообразованию [10].

При исследовании концентрационных кривых зависимостей вязкости рассматриваемых жидкостей было отмечено наличие минимумов при некоторой, достаточно малой концентрации наночастиц

[10, 12]. Причем подобные изменения характерны только для небольшой области малых концентраций наночастиц. Степень изменения реологических свойств и величина оптимальной концентрации (во многих случаях это доли процентов и менее), при которой могут наблюдаться подобные явления, зависит от вида наночастиц и физико-химических свойств используемых сред. Поведение совершенно различных дисперсных систем (к которым относятся нефтяное топливо, водотопливные эмульсии и водоугольные суспензии) в присутствии наночастиц оказывается схожим. Это связано с тем, что для существования дополнительного структурообразования главными являются только два момента: сам факт введения наночастиц с избыточной поверхностной энергией в дисперсную систему и возможность перемещения и ассоциации молекул вокруг них за счет жидкого агрегатного состояния системы.

Полученные для углеводородного топлива результаты хорошо описываются предложенной в работе [10] для битума и развитой далее в [19, 20] концепцией гетеросфер – дополнительного структурообразования дисперсионной среды вокруг наночастиц в жидких гетерогенных системах. Анализ кривых динамической вязкости говорит о том, что поведение топочного мазута обуславливается возникновением структурной сетки, связывающей большие ассоциаты молекул высокомолекулярных алканов или смолисто-асфальтеновых компонентов. Введение наночастиц, например углеродных нанотрубок, меняет внутреннюю структуру топлива, модифицируя вид исследуемых кривых. Наночастицы играют роль структурообразующих центров, вокруг которых под действием избыточной поверхностной энергии наночастиц образуются упорядоченные слои компонентов материала матрицы. При малых концентрациях наночастиц упорядоченные (и за счет этого, вероятно, более плотные образования), названные гетеросферами, 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 оставшейся менее плотной части дисперсионной среды. При этом плоскость скольжения от приложенной деформации будет приходиться именно на эту прослойку, приводя к возникновению послойного сдвигового течения и, соответственно, резкому уменьшению вязкости для небольшой области концентраций. При последующем увеличении концентрации наночастиц

должно происходить сцепление гетеросфер, проявляющееся в повышении кинематической вязкости. Таким образом, при определении оптимальной концентрации наночастиц важно попасть внутрь определенного концентрационного диапазона, который зависит как от вида наночастиц, так и от вида дисперсионной среды.

Необходимо также отметить, что анизотропная форма наночастиц (в первую очередь это касается углеродных нанотрубок, длина которых в среднем варьирует от 50 до 500 нм при среднем диаметре нанотрубок 15–20 нм) может приводить к образованиям не совсем сферической формы. Однако все вышеприведенные рассуждения остаются справедливыми за исключением возможностей свободного вращения гетеросфер – в этом случае следует ожидать только разворота образований и их ориентацию в направлении действия сил, что не мешает послойному сдвиговому течению.

Эффект добавления малых количеств наночастиц (в том числе совместно с другими добавками, уже доказавшими ранее свою эффективность) может быть использован для дальнейшего улучшения реологических свойств различных видов углеводородного топлива, способствуя снижению энергоемкости и себестоимости продукции в технологических процессах [22–26, 28–31]. Однако практическое использование данного эффекта требует решения двух вопросов. Во-первых, необходимо определить возможные виды наночастиц, которые можно добавлять в топливо. Во-вторых, требуется определить диапазон концентраций используемых наночастиц, для которого будут проявляться необходимые эффекты.

### **Использованные наноматериалы**

Известно, что наночастицы являются достаточно дорогими образованиями, использование которых может нанести вред окружающей среде. Поэтому в качестве наночастиц нами были выбраны углеродные нанотрубки (УНТ), которые с большим успехом уже применяются в различных областях энергетики. Несмотря на то, что углеродные нанотрубки являются биологически неразлагаемыми наночастицами, они полностью сгорают вместе с топливом, поскольку состоят из чистого углерода, а их каталитические свойства приводят к более полному сгоранию других компонентов топлива, что может оказаться важным для устранения негативных последствий использования тяжелого топлива.

Механизм каталитической активности углеродных нанотрубок связан с тем, что они обладают высокой удельной поверхностью, и при присоединении к ним различных радикалов образуют каталитические центры, которые могут быть использованы для гетерогенного катализа. При диспергировании УНТ ультразвуковое воздействие провоцирует разделение нанотрубок на более короткие куски, имеющие открытые края. Поскольку присоединение функциональных групп в первую очередь происходит к открытым краям и к дефектам поверхности, каталитическая активность открытых нанотрубок заметно превышает соответствующий параметр для замкнутых нанотрубок. В частности, углеродные нанотрубки, содержащие железо, являются эффективными катализаторами восстановления кислорода, поскольку железо-углеродные центры в них образуют активные центры. Было показано [32], что эффективный катализатор на основе углеродных нанотрубок может быть получен и без использования металла в присутствии малого количества азота, что предполагает новый механизм каталитической активности углеродных нанотрубок в восстановлении кислорода. Выяснилось [33], что аналогичный механизм имеет место и при наличии других атомов, таких как фосфор, бор, сера, селен. Все вышеперечисленные атомы всегда присутствуют в составе топлива, а потому могут образовывать комплексы с углеродными нанотрубками. Восстановленный с их помощью кислород способствует более полному сгоранию всех компонентов топлива.

В настоящее время производство углеродных наноматериалов, к которым относятся различные виды углеродных нанотрубок, вышло за рамки лабораторных и полупромышленных установок, что дает возможность предположить экономическую целесообразность их использования. Для экспериментов мы выбрали углеродные нанотрубки углеродного наноматериала «Таунит» (<http://www.nanotc.ru>), характеризующиеся их относительной дешевизной и доступностью. SEM-изображение водных суспензий углеродных нанотрубок углеродного наноматериала «Таунит» приведено на рис. 1.93.



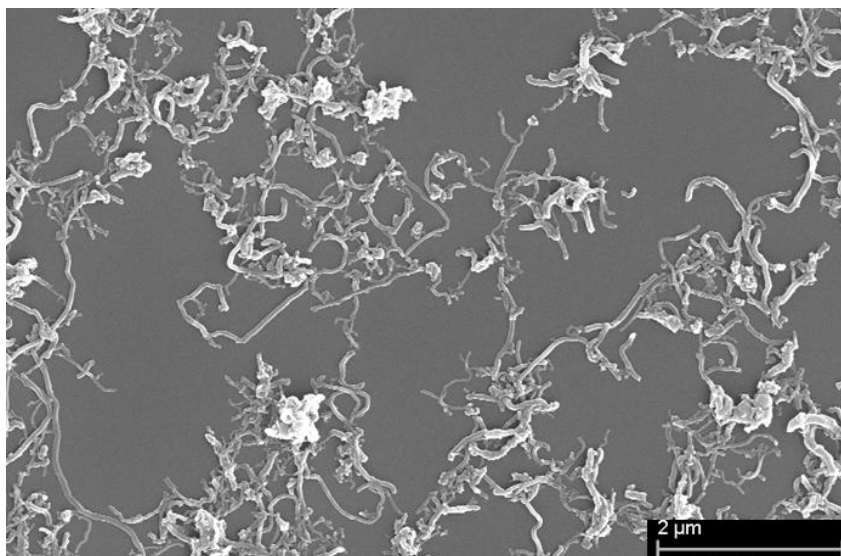


Рис.1.93. SEM-изображение водных суспензий углеродных нанотрубок углеродного наноматериала «Таунит»

Для улучшения физико-химических свойств органического топлива, повышения эффективности и экологичности сгорания и в целях его экономии кроме использования углеродных нанотрубок наметилась тенденция добавления к топливу функциональных наноразмерных структур – наночастиц металлов, оксидов, карбидов, нитридов. Эффективными для дизельного топлива оказались наночастицы алюминия, железа, бора, марганца, магния, меди, кальция и церия, а также оксидов алюминия, цинка, марганца, меди и всех лантаноидов.

Проведенные нами исследования показали, что использование дорогостоящих наночастиц в качестве добавок к тяжелому углеводородному топливу в некоторой степени может быть заменено добавками обезвоженного карбонатного шлама, являющегося отходом процесса химводоочистки тепловых электростанций. Карбонатный шлам образуется в процессе коагуляции и известкования природных вод на тепловых электростанциях и с производственной точки зрения является отходом. Карбонатный шлам как продукт, полученный химическим осаждением, обладает комплексом специфических физико-химических свойств, среди которых следует отметить разнообразный химический состав (карбонаты кальция, гидроксиды магния и железа, соединения алюминия и т.д.), а также его высокую дисперсность и поверхностную активность. Входящие в его состав соединения образуют нано- и микроразмерную структуру, изначально разделенную молекулами воды. В процессе его обезвоживания состав и структура частиц карбонатного шлама становится сходной с теми наночастицами, которые были использованы для улучшения показателей дизельного топлива.

В качестве присадки к топливу была использована тонко-дисперсная фракция обезвоженного карбонатного шлама с размером частиц не более 0,09 мм с суммарным содержанием карбонатов кальция и магния не менее 85 %. По своему строению и качествам обезвоженный карбонатный шлам за счет большого количества пор, возникших при его обезвоживании, может быть отнесен к наноструктурным образованиям. Однако следует отметить не только отсутствие каких-либо вредных экологических последствий применения данной добавки, но и снижение выбрасываемых оксидов серы на 36,5 масс. % при сжигании мазута марки М100 с использованием карбонатного шлама в количестве 0,1 масс. % при сернистости топлива 3,5 масс. % [34].

Для диспергирования углеродных нанотрубок использовались водные растворы анионного поверхностно-активного вещества (ПАВ) – додецилсульфата натрия (ДСН, Sigma, L4509), которыми заливали навески УНТ. Для лучшего диспергирования углеродных нанотрубок образцы подвергались в течение 15 мин при температуре 40 °С обработке ультразвуком с частотой 15 кГц в водяной бане ультразвукового диспергатора Bandelin SONOREX TK52 (Германия). Присутствие ПАВ способствовало более сильному диспергированию УНТ в водной среде за счет проникновения молекул ПАВ в промежутки между нанотрубками, к их разъединению и созданию адсорбционного слоя молекул ПАВ на всей поверхности нанотрубок [35].

В качестве присадки к тяжелому котельному топливу и для диспергирования углеродных нанотрубок также применялся дипроксамин-157 производства КазаньОргсинтез (<http://www.kazanorgsintez.ru>), обычно используемый в качестве неионогенного деэмульгатора и ингибитора парафиноотложений в нефтяной и нефтеперерабатывающей промышленности или в качестве деэмульгирующей присадки к смазочным материалам, в частности турбинным маслам. Деэмульгаторы – поверхностно-активные вещества, способные вытеснить с поверхности глобул воды, диспергированной в нефти, бронирующую оболочку, состоящую из входящих в ее состав полярных компонентов, а также частиц парафина и механических примесей.

Дипроксамин – азотсодержащий блоксополимер окисей этилена и пропилена на основе этилендиамина – один из универсальных отечественных деэмульгаторов. Является неионогенным поверхностно-активным веществом. Средняя молекулярная масса полимерных молекул дипроксамина 4500–5000. По своим размерам и структуре молекулы дипроксамина также в некоторой степени аналогичны наночастицам [20].

## Методы исследования и виды изучаемого топлива

Уменьшение вязкости топлива, приводящее к снижению энергетических затрат при его перекачке по трубопроводам, разгрузке из цистерн и подаче в котел, имеет принципиальное значение в целях энергосбережения. Динамическая вязкость различных видов котельного топлива была исследована 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 мазута. Угловая скорость варьировалась от 50 до 300  $\text{с}^{-1}$ . Работа вискозиметра управлялась с персонального компьютера через программное обеспечение «VISCO-RM SOFT».

Условная вязкость (в градусах Энглера,  $^{\circ}\text{E}$ ) определялась с помощью вискозиметра Энглера ВУ-М-ПХП. Для нахождения кинематической вязкости использовались таблицы перевода градусов Энглера в сантис-токсы ( $1 \text{ сСт} = 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ).

Исследованы образцы высокосернистого топочного мазута марки М100 производства Нижнекамского нефтеперерабатывающего завода, используемого на ТЭЦ г. Казани в качестве аварийного и резервного топлива. В соответствии со структурно-групповым составом топочный мазут марки М100 представлен в основном парафиновыми (49,2 %) и ароматическими углеводородами (42,6 %). Следует отметить, что при изучении вязкости образцов мазута и водотопливных эмульсий с присадками, приготовленных на основе данных образцов, мы столкнулись с принципиально разными видами зависимости вязкости для конкретных проб мазута, взятых в разное время из различных источников. Даже в рамках одной марки два образца могут демонстрировать как различающиеся почти в 2 раза значения вязкости, так и отличающееся реологическое поведение в зависимости от градиента скорости перемещения слоев. Этот факт несомненно усложняет описание процессов, происходящих при добавлении наноструктурных образований к топливу, и вносит свои коррективы в воспроизводимость результатов.

В качестве модельной системы, позволяющей исследовать реологические свойства альтернативного топлива при добавлении наночастиц, была взята жидкая водоугольная суспензия, приготовленная на основе тощих углей Кузнецкого бассейна и содержащая 30 % угля и 70 % воды, либо 40 % угля и 60 % воды. Приготовление проб водоугольной суспензии проводилось следующим образом. Дробленый уголь направлялся на измельчение в вибрационную мельницу. Полученная угольная пыль просеивалась на отдельные фракции с размерами 0,2; 0,125; 0,09; 0,063; 0,05 мм. Частицы размерами до 90 мкм отделялись на ситах, взвешивались и подавались в смеситель, в который дозировалась вода из мерной емкости. Тощие угли Кузнецкого месторождения характеризуются высокой гидрофильностью поверхности за счет значительного содержания кислородсодержащих фрагментов. Вследствие этого они обладают выраженной способностью к формированию развитых гидратированных слоев вокруг частиц и структурных образований в суспензионных топливах. Уголь не только связывает дисперсионную среду, но и «набухает» – физический объем и плотность в результате взаимодействия с жидкостями изменяются. Для добавления в водоугольное топливо углеродные нанотрубки диспергировались в водном растворе анионного ПАВ – додецилсульфата натрия [36]. Использование дипроксамина для диспергирования УНТ ухудшало вязкостные свойства водоугольных суспензий [37].

### **Реологические свойства мазута с добавлением наноматериалов**

На первом этапе изучения реологических свойств тяжелого котельного топлива [2] нами были взяты пробы мазута марки М100 по 100 мл, на основе которых были приготовлены образцы водомазутной эмульсии, содержащие:

- 1) чистый мазут (контрольный образец);
- 2) мазут, смешанный с 20 мл дистиллированной воды;
- 3) мазут, смешанный с дисперсией ДСН с концентрацией 100 мМ;
- 4) мазут с дисперсией ДСН (100 мМ) и 0,5 г УНТ (0,41 масс. %);
- 5) мазут с дисперсией ДСН (100 мМ) и 1,0 г УНТ (0,82 масс. %).

Измерения вязкости мазута и водомазутных эмульсий производились при двух температурах (75 и 85 °С) и различных скоростях сдвига. Результаты экспериментальных исследований,

относящиеся к образцам 1–5 и характеризующиеся наименьшими значениями вязкости мазута и водотопливных эмульсий на его основе в зависимости от скорости сдвига с учетом погрешности эксперимента, в графическом виде представлены на рис. 1.93. Впервые нами было показано, что введение суспензий углеродных нанотроек (0,82 масс. %) может приводить к улучшению текучести мазута на 11–26 %. Поскольку из-за их относительно высокой стоимости использовать углеродные нанотрочки в таких концентрациях пока нерентабельно, полученный результат имел лишь принципиальный характер.

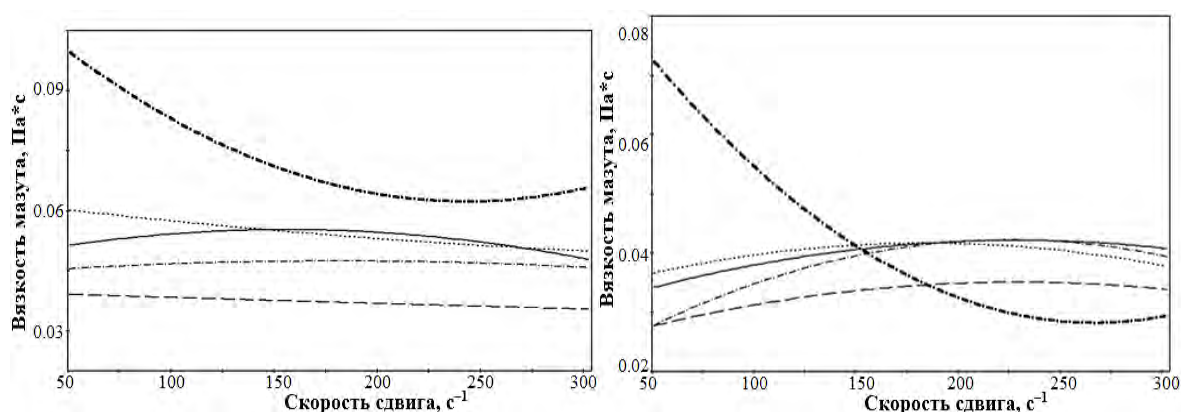


Рис. 1.93. Зависимость динамической вязкости проб мазута марки М100 и смесей на его основе от скорости сдвига при  $t = 75\text{ }^{\circ}\text{C}$  (слева) и  $t = 85\text{ }^{\circ}\text{C}$  (справа):  
 - · - · - чистый мазут; — · — · — мазут, содержащий дистиллированную воду; — мазут, содержащий дисперсию ДСН с концентрацией 100 мМ;  
 - - - - мазут, содержащий 0,41 масс. % УНТ в водной дисперсии ДСН (100 мМ);  
 - - - - мазут, содержащий 0,82 масс. % УНТ в водной дисперсии ДСН (100 мМ)

Эксплуатационные свойства топочных мазутов марки М100 при использовании присадки дипроксамин-157 и присадки на основе карбонатного шлама изучались в работе [28]. Как видно из рис. 1.93, по сравнению с вязкостью чистого мазута в случае использования дипроксамина вязкость уменьшается на 19–21 %, карбонатного шлама – на 7–10 % при концентрации присадки в мазуте 0,5 масс. %, что минимизирует расход тепла на подогрев мазута при разгрузке из цистерн, хранении и подаче в котел. Однако произведенная нами перепроверка данных о реологическом поведении мазута с добавлением дипроксамина при другой температуре (65 °С) показала, наоборот, некоторое ухудшение результатов. Следовательно, использование чистого дипроксамина для улучшения вязкостных характеристик мазута может не дать ожидаемых результатов.

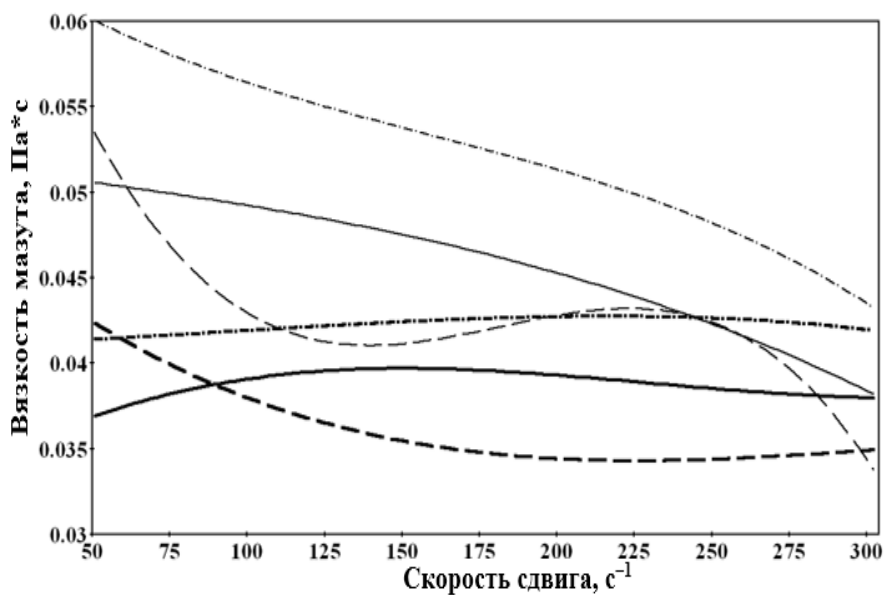


Рис. 1.93. Зависимость динамической вязкости проб мазута марки М100 и смесей на его основе от скорости сдвига при различных температурах:

- чистый мазут при  $t = 75\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; - · - · - чистый мазут при  $t = 85\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- — — — мазут, содержащий Дипроксамин-157 при  $t = 75\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- — — — мазут, содержащий Дипроксамин-157 при  $t = 85\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- мазут, содержащий присадку на основе карбонатного шлама при  $t = 75\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- мазут, содержащий присадку на основе карбонатного шлама при  $t = 85\text{ }^{\circ}\text{C}$

Пробы мазута, продемонстрировавшие аномальное поведение при добавлении дипроксамина, были исследованы нами и в других экспериментах (рис. 1.94, а). Поскольку водомазутные эмульсии с добавлением УНТ на водной основе дают уменьшение вязкости только при достаточно больших концентрациях УНТ (0,82 масс. %), что в первую очередь связано с наличием воды, ухудшающей свойства мазута, при приготовлении следующих образцов к мазуту добавлены углеродные нанотрубки, диспергированные в нефтерастворимом неионогенном ПАВ – дипроксамине [20]. На рис. 1.94, б показана зависимость динамической вязкости образца мазута М100 с добавлением суспензии УНТ в дипроксамине (концентрация 0,0125 масс. % УНТ + 0,5 масс. % дипроксамина) в зависимости от скорости сдвига при температурах 65 и 75 °C. Из графика видно, что уменьшение динамической вязкости образцов составляет 12–15 %. Отметим, что именно в этом образце использование чистого дипроксамина в тех же концентрациях вызывало ухудшение текучести топлива, а добавление достаточно малого количества углеродных нанотрубок привело к обратному результату.

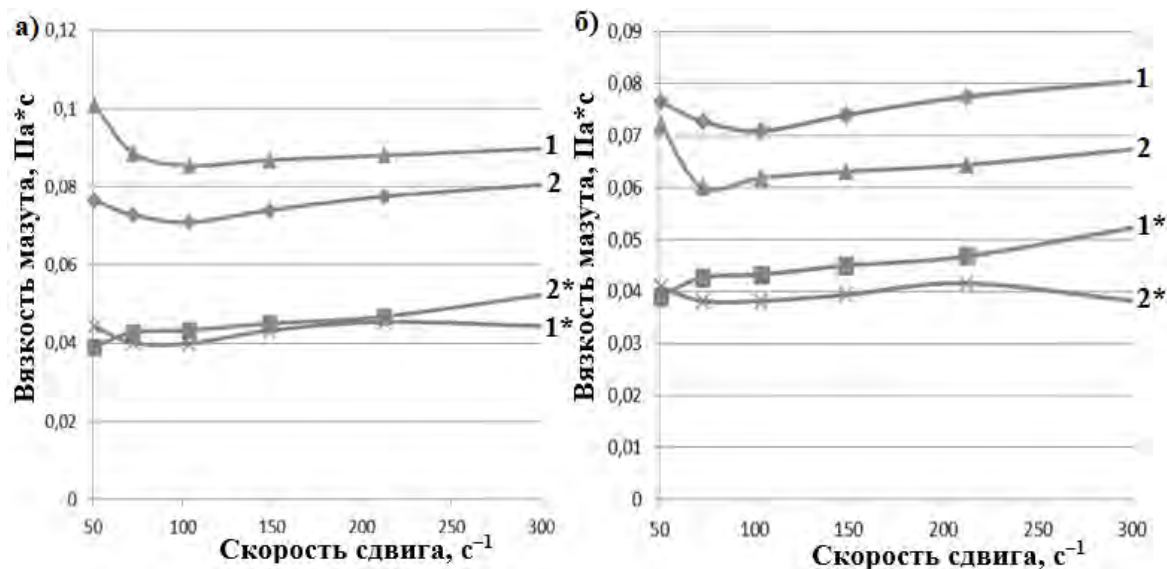


Рис. 1.94. Зависимость динамической вязкости в зависимости от скорости сдвига при температурах 65 и 75 °С (\*):  
*а* – образец чистого мазута (1) и с добавлением 0,5 масс. % дипроксамина (2);  
*б* – образец чистого мазута (1) и с добавлением 0,0125 масс. % УНТ + 0,5 масс.% дипроксамина (2)

На рис. 1.95, *а* приведена зависимость динамической вязкости образца мазута М100 (концентрация 0,0063 масс. % УНТ + 0,25 масс. % дипроксамина + 0, масс. % карбонатного шлама) в зависимости от скорости сдвига при температурах 65 и 75 °С. Этот образец, на наш взгляд, дает наилучшие результаты, показывая уменьшение вязкости даже при небольших скоростях сдвига, что говорит об отсутствии явного структурообразования в нефтяной гетерогенной системе. Кроме того, следует отметить уменьшенное содержание в данном образце дополнительных ценообразующих присадок – дипроксамина и УНТ.

На рис. 1.95, *б* показана зависимость динамической вязкости образца мазута М100 с чуть большим содержанием УНТ (концентрация 0,0125 масс. % УНТ + 0,5 масс. % дипроксамина + 0,5 масс. % карбонатного шлама) в зависимости от скорости сдвига при температурах 65 и 75 °С. Увеличение количества наночастиц привело к ухудшению реологических свойств топливного мазута при 65 °С. Этот результат, как будет показано далее в обсуждении механизмов вязкости, вполне ожидаем и может быть объяснен.

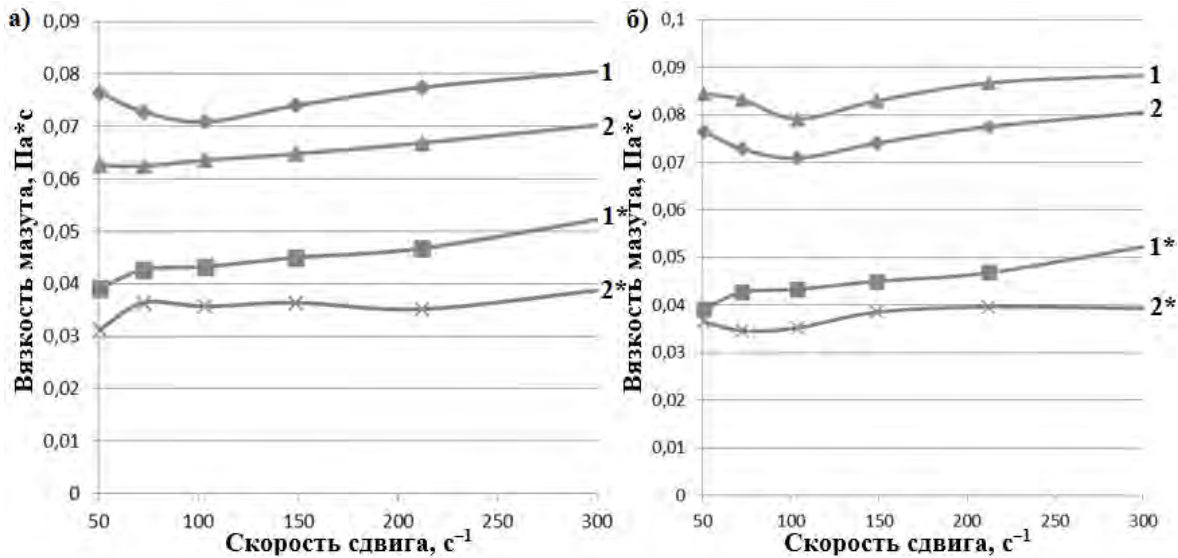


Рис. 1.95. Зависимость динамической вязкости в зависимости от скорости сдвига при температурах 65 и 75 °С (\*):

- а* – образец чистого мазута (1) и с добавлением 0,0063 масс. % УНТ + 0,25 масс. % дипроксамина + 0,5 масс. % карбонатного шлама (2);  
*б* – образец чистого мазута (1) и с добавлением 0,0125 масс. % УНТ + 0,5 масс. % дипроксамина + 0,5 масс. % карбонатного шлама (2)

Наряду с наблюдаемыми положительными эффектами при добавлении к мазуту присадок минерального характера увеличивается его зольность. Исследования показали, что при использовании карбонатного шлама в концентрации 0,1 масс. % зольность увеличивается в 3 раза, а для концентраций 0,5 масс. % – уже в 10 раз. Поэтому нами также было рассмотрено воздействие карбонатного шлама в концентрации 0,1 масс. % на вязкостные характеристики котельного топлива. Проведенные исследования реологических свойств образцов чистого мазута и мазута с присадкой карбонатного шлама с концентрацией 0,1 масс. % показали снижение вязкости при указанных температурах и различных скоростях сдвига (50–300 с<sup>-1</sup>). Это означает, что использование карбонатного шлама может приводить к снижению вязкости топлива при малом увеличении зольности мазута. При этом улучшение вязкостных свойств происходит наряду с уменьшением коррозионной активности топлива и при значительном снижении выбросов оксидов серы в атмосферу [34]. Полученные результаты позволяют предполагать значительную экономическую эффективность использования карбонатного шлама в качестве присадки к котельному топливу.



## Реологические свойства водоугольных суспензий с добавлением наноматериалов

На первом этапе углеродные нанотрубки, добавляемые в водоугольное топливо, были диспергированы в дипроксамине, поскольку именно этот вариант оказался наиболее предпочтительным для мазутов [37]. Приготавливалась такая же суспензия УНТ, как и для мазутов: 1 г УНТ диспергировался в 40 мл дипроксамина. Однако проведенные исследования показали, что во всех случаях вязкость чистого водоугольного топлива была наименьшей. Добавление наноструктур, диспергированных в дипроксамине не только увеличивало вязкость топлива, но и приводило к сильному структурированию образца, на что указывает резкий спад начальной части экспериментальных кривых зависимости динамической вязкости от скорости сдвига. Более того, прослеживается четкая зависимость вязкости от концентрации наночастиц: чем больше концентрация, тем меньше текучесть топлива. Такое поведение, как будет описано чуть позднее, является достаточно характерным для всех наночастиц в жидкостях. Существует область концентраций, когда вязкость жидкой гетерогенной системы уменьшается. За пределами этого интервала, наоборот, в системе возникает дополнительное структурообразование, приводящее к увеличению вязкости.

В рассмотренных на данном этапе экспериментах мы не попали в интересующую нас область снижения вязкости водоугольных суспензий. Оказалось, что использование дипроксамина для диспергирования УНТ и в качестве добавки к водоугольному топливу, наоборот, приводит к уменьшению текучести ВУТ. Тем не менее, полученные результаты могут быть интересны для разработки других видов композиционного топлива, например для водонефтекоксового топлива, требующего применения загустителей.

Поскольку дипроксамин с водоугольным топливом оказались не очень совместимыми, на очередном этапе нашей работы углеродные нанотрубки для добавок в ВУТ были диспергированы в водных растворах додецилсульфата натрия, а карбонатный шлам использовался как самостоятельная добавка. Предварительные результаты, полученные для двух различных температур (65 и 75 °С), представлены на рис. 1.96. Выбрана достаточно небольшая концентрация УНТ: 0,0125 масс. % УНТ + 0,25 мл раствора ДСН + 99,75 мл ВУТ. Такие концентрации являются

экономически оправданными для столь значительного снижения вязкости (в 2–3 раза), как наблюдалось в наших экспериментах. В этой ситуации хорошие результаты отмечались и при добавлении в ВУТ карбонатного шлама, при наличии которого вязкостные характеристики ВУТ уменьшаются в 1,5 раза.

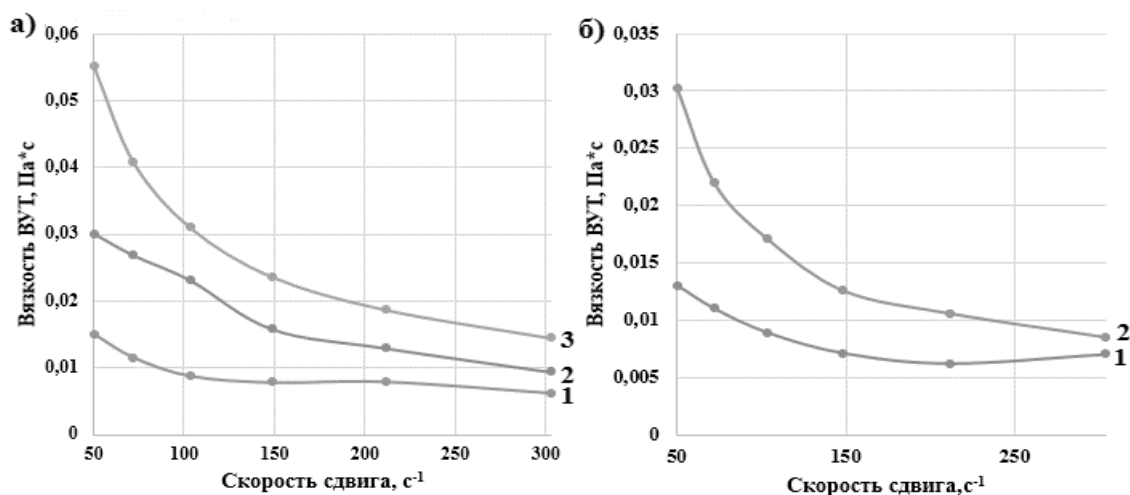


Рис. 1.96. Зависимость динамической вязкости проб водоугольного топлива и смесей на его основе от скорости сдвига: а – при  $T = 65\text{ }^{\circ}\text{C}$  без добавок (кривая 1), с карбонатным шламом (0,5 масс. %, кривая 2) и с углеродными нанотрубками, диспергированными в 100 мМ растворе ДСН (0,0125 масс. % УНТ + 0,25 мл раствора ДСН, кривая 3); б –  $T = 75\text{ }^{\circ}\text{C}$  без добавок (кривая 1), с карбонатным шламом (0,5 масс. %, кривая 2)

Однако транспортировка ВУТ происходит при других температурах. Кроме того, 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 частности, на рис. 1.97 приведены графики динамической вязкости образцов ВУТ с добавлением карбонатного шлама (слева для фракции частиц угля размером 0,001 мм при 30 °С) или УНТ (для фракции частиц угля размером 0,005 мм при 40 °С). Видно, что в данных образцах при температурах эксперимента степень снижения вязкостных свойств не является столь значительной.

Предложенная концепция гетеросфер – областей дополнительного структурообразования дисперсионной среды вокруг наночастиц в жидкости – позволяет, в основном, объяснить изменения вязкости, наблюдавшиеся нами для тяжелого котельного топлива (топливных мазутов) и жидкого водоугольного топлива при добавлении

наноструктурных образований. Более того, согласно этой концепции область снижения вязкости приходится на малые концентрации наночастиц. Действительно, наилучшие результаты для мазута марки М100 при 75 °С, которые наблюдались нами, соответствовали концентрациям УНТ порядка 0,0125 масс. % [22].

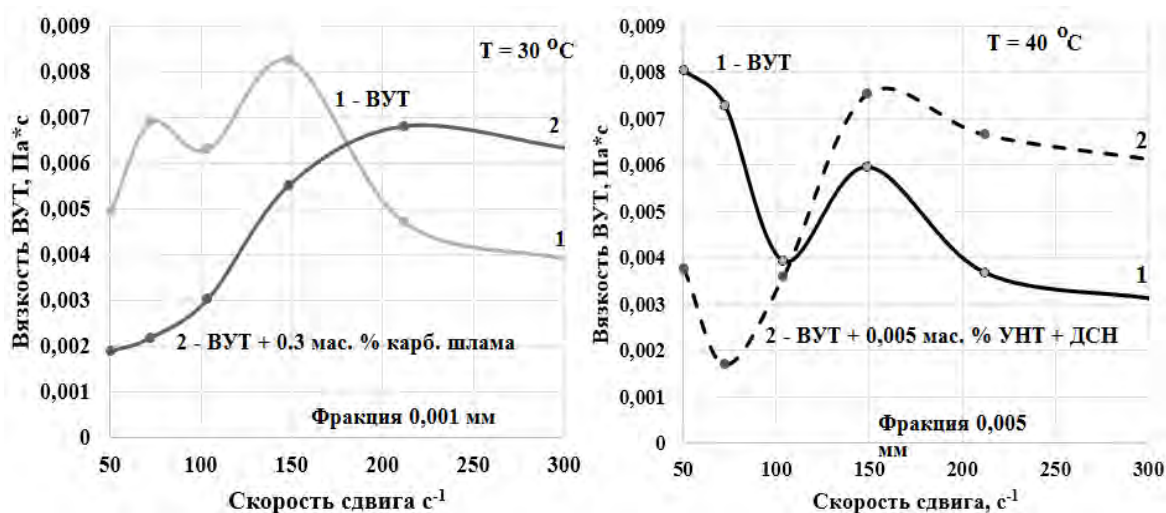


Рис. 1.97. Динамическая вязкость образцов ВУТ с добавлением карбонатного шлама (слева для фракции частиц угля размером 0,001 мм при 30 °С) или УНТ (справа для фракции частиц угля размером 0,005 мм при 40 °С)

Для подтверждения концепции дополнительного структурообразования в присутствии наночастиц нами были проведены дополнительные исследования концентрационных зависимостей условной вязкости различных видов углеводородного топлива. На рис. 1.98 слева представлена концентрационная зависимость условной вязкости образцов мазута М100 с добавлением углеродных нанотрубок, диспергированных в дипроксамине. На рис. 1.98 справа исследована зависимость условной вязкости образца мазута, дополнительно включающего в себя 0,1 масс. % карбонатного шлама, от концентрации УНТ. Следует отметить, что поскольку УНТ диспергированы в дипроксамине, увеличение их концентрации приводит к одновременному увеличению концентрации дипроксамина. Уменьшение вязкости мазута может происходить как за счет увеличения концентрации дипроксамина (известно, что эта зависимость носит линейный характер), так и за счет увеличения концентрации УНТ. Зависимость вязкости мазута от концентрации УНТ не так проста. Снижение вязкости на начальном этапе может смениться ее последующим ростом. Реально наблюдаемые процессы должны отражать обе тенденции.

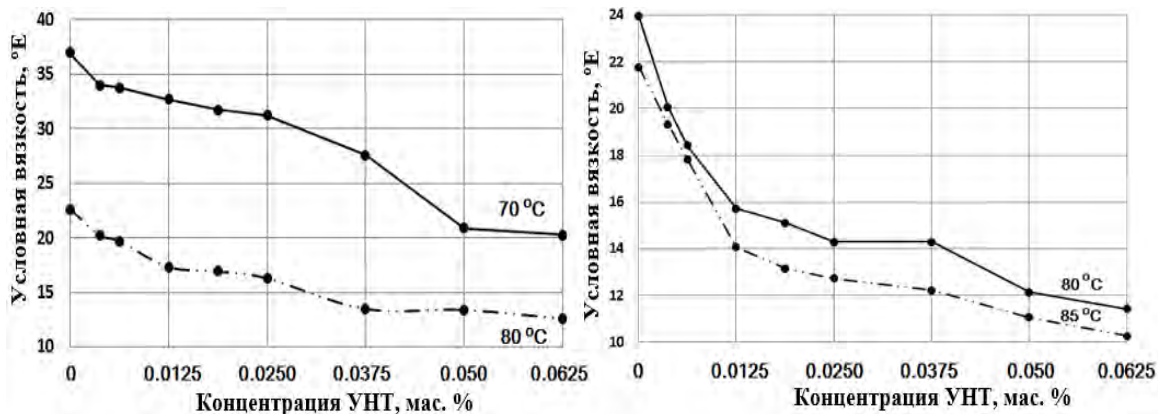


Рис. 1.98. Условная вязкость образцов мазута М100 совместно с суспензией УНТ в дипроксамине в зависимости от концентрации УНТ (концентрации 0,025 масс. % УНТ соответствует добавление 1,0 масс. % дипроксамина (слева) и с дополнительно добавленными 0,1 масс. % карбонатного шлама (справа))

Ход концентрационных зависимостей условной вязкости говорит о существовании перелома (прекращению резкого падения вязкости) в точке с концентрацией 0,0125 масс. %, наличие которого может свидетельствовать о существовании минимального значения вязкости за счет структурообразования под действием УНТ. Несмотря на сохраняющуюся тенденцию к уменьшению вязкости при дальнейшем увеличении концентрации УНТ с дипроксаминном, использование больших концентраций наночастиц может стать экономически неоправданным. Кроме того, сравнение рассматриваемых зависимостей (слева и справа) говорит о наличии синергетического эффекта при совместном применении УНТ с карбонатным шламом.

В случае водоугольного топлива нами были исследованы зависимости условной вязкости ВУТ, приготовленного на основе фракций частиц угля размером 0,125 и 0,01 мм, от концентрации карбонатного шлама (рис. 1.99). В случае добавления карбонатного шлама следует отметить одну особенность – увеличение вязкости в диапазоне малых концентраций данной присадки. Наблюдающееся увеличение вязкости может быть объяснено поглощением и связыванием воды – наиболее жидкой фракции дисперсионной среды и, соответственно, к повышению вязкости ВУТ. Тем не менее, дальнейшее увеличение концентрации шлама приводит к снижению вязкости топлива, минимум которого наблюдается при концентрации карбонатного шлама, равной 0,3 масс. %. Указанная концентрация соответствует возникновению структурообразования вокруг частиц шлама и способствует образованию структур с малопрочными

коагуляционными контактами по плоскостям, определяющим значительное развитие пластичных деформаций, приводящих к послойному сдвиговому течению и снижению вязкости [36].

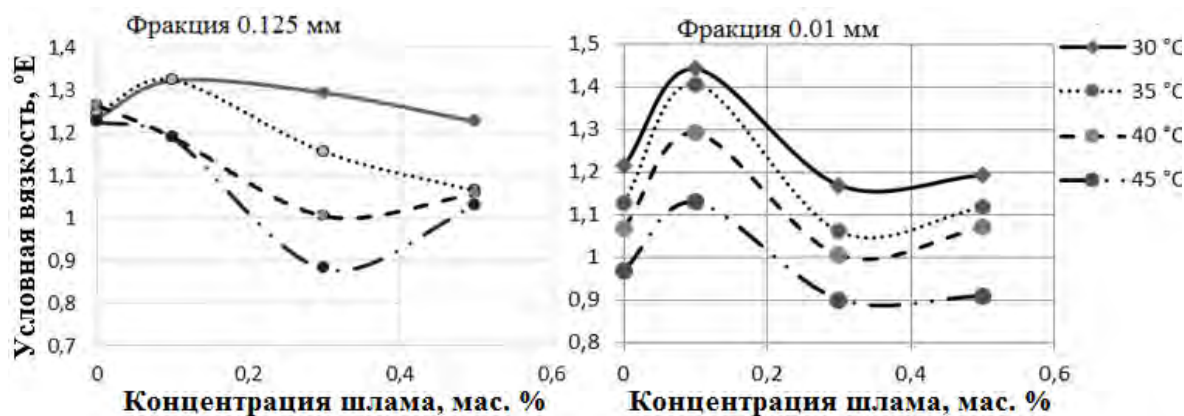


Рис. 1.99. График зависимости условной вязкости ВУТ от концентрации присадки – карбонатного шлама для двух разных фракций частиц угля при различных температурах

На графиках зависимости условной вязкости ВУТ для двух разных фракций частиц угля при различных температурах (рис. 1.100) от концентрации углеродных нанотрубок, диспергированных в 100 мМ растворе ДСН также четко прослеживается существование минимума, соответствующего концентрации 0,005 масс. % УНТ.

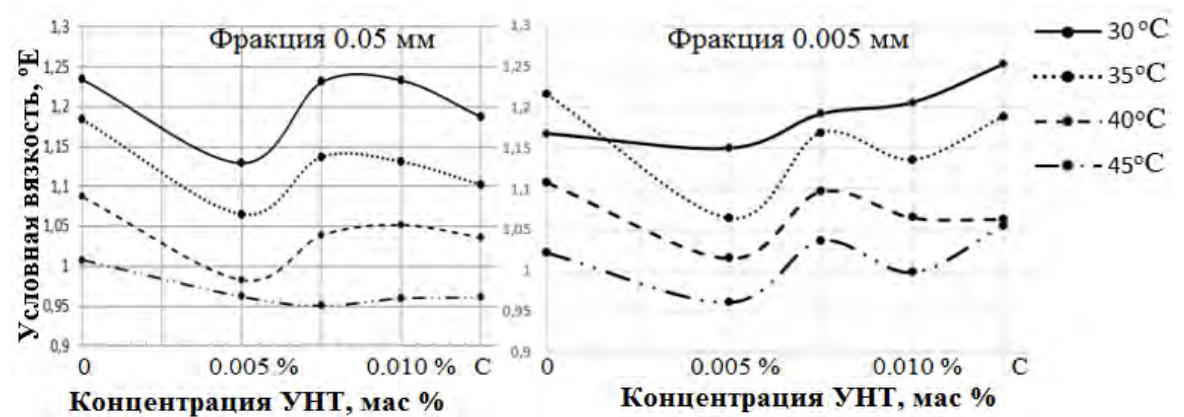


Рис. 1.100. График зависимости условной вязкости ВУТ от концентрации присадки – углеродных нанотрубок, диспергированных в 100 мМ растворе ДСН для двух разных фракций частиц угля при различных температурах

Таким образом, использование концепции гетеросфер и выбор правильной среды диспергирования УНТ для конкретного вида углеводородного топлива позволяет существенно сузить область поиска оптимальных концентраций добавок рассматриваемых компонентов.

## Заключение

На основании полученных экспериментальных данных по изучению вязкостных свойств котельного топлива с добавлениями наноструктурных образований и дальнейшего развития теории, предложенной для описания процессов, происходящих в гетерогенных системах, выявлен механизм влияния нанодобавок на технологические свойства нефтяного и водоугольного топлива, определен тип среды диспергирования и интервал оптимальных концентраций добавок, составляющий 0,005–0,015 масс. % для углеродных нанотрубок и 0,1 масс. % для обезвоженного карбонатного шлама.

## Список литературы

1. Shaafi T., Sairam K., Gopinath A., Kumaresan G., Velra R. Effect of dispersion of various nanoadditives on the performance and emission characteristics of a CI engine fueled with diesel, biodiesel and blends –A review // *Renew. Sust. Energ. Rev.* 2015. V. 49. P. 563–573.
2. Зверева Э.Р., Зуева О.С., Хабибуллина Р.В. и др. Влияние присадок на основе углеродных нанотрубок на реологические характеристики жидкого котельного топлива // *Химия и технология топлив и масел.* 2016. № 5. С. 15–19.
3. Лаптев А.Г., Зверева Э.Р., Ганина Л.В. Использование карбонатного шлама водоподготовки в мазутных хозяйствах электростанций // *Труды Академэнерго.* 2011. № 1. С. 55–63.
4. Зверева Э.Р., Мингалеева Г.Р., Хабибуллина Р.В., Ахметвалиева Р.Г. Улучшение вязкостных характеристик котельного топлива присадками // *Нефтехимия.* 2016. Т. 56. № 1. С. 73–75.
5. Зверева Э.Р., Зуева О.С., Хабибуллина Р.В. и др. Повышение показателей качества котельного топлива при использовании присадок // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики.* 2016. № 1–2. С. 28–36.
6. Yao H., et al. Rheological properties and chemical analysis of nanoclay and carbon microfiber modified asphalt with Fourier transform infrared spectroscopy // *Construction and Building Materials.* 2013. V. 38. P. 327–337.
7. Ильин С.О., Аринина М.П., Мамулат Ю.С., Малкин А.Я., Куличихин В.Г. Реологические свойства дорожных битумов, модифицированных полимерными и наноразмерными твердыми добавками // *Коллоидный журнал.* 2014. Т. 76. № 4. С. 461–471

8. Трухина М.В., Мокочунина Т.В., Кузьмин М.О., Провоторов М.В. Исследование характеристик наножидкости типа ArmCap-W и перспективы применения такого рода продуктов // Нанотехника, №2 (34). 2013. С. 48–58.
9. Мокочунина Т.В., Парфененкова В.Е., Винокуров В.А., Провоторов М.В. Исследование влияния наночастиц синтетических алмазов на трибологические характеристики базовых нефтяных масел // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2014. № 7. С. 42–48.
10. Мокочунина Т.В. Упрочняющее модифицирование продуктов нефтепереработки углеродными наночастицами: дисс... канд. техн. наук. Москва: РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2015.
11. Кривцов Е.Е., Никулин Н.М., Ясинская Е.В. Исследование характеристик наномодифицированных сухих строительных смесей // Инженерно-строительный журнал. 2011. № 2. С. 29–32.
12. Пыхтин А.А. и др. Влияние ультрадисперсных наполнителей на свойства низкомолекулярных жидкостей и композиций на основе эпоксидных олигомеров // Вестник МИТХТ. 2013. Т. 8. № 4. С. 113–117.
13. Shumsky V.F., Lipatov Yu.S., Kulichikhin V.G., Getmanchuk I.P. Rheological properties of carbon black-filled blends of liquid-crystalline copolyester with thermoplastic polysulfone // Rheologica Acta. 1993. V. 32 (4). P. 352–360.
14. Mackay M.E., Dao T.T., Tuteja A., et al. Nanoscale effects leading to non-einstein-like decrease in viscosity // Nature Materials. 2003. V. 2. P. 762–766.
15. Куличихин В.Г., Семаков А.В., Карбушев В.В., Платэ Н.А., Picken S.J. Переход хаос-порядок в критических режимах течения сдвига расплавов полимеров и нанокомпозитов // Высокомолек. соед. 2009. Т. 51. № 11. С. 2044–2053.
16. Малкин А.Я., Куличихин В.Г. Структура и реологические свойства высококонцентрированных эмульсий. Современный взгляд // Успехи химии. 2015. Т. 84 (8). С. 803–825.
17. Шитов Д.Ю., Кравченко Т.П., Осипчик В.С., Раков Э.Г. Композиционные материалы на основе полипропилена с углеродными нанонаполнителями // Пластические массы. 2013. № 3. С. 29–32.
18. Борисова В.С., Шитов Д.Ю., Диканова Н.С. и др. Особенности реологического поведения нанокомпозитов на основе полипропилена // Успехи в химии и химической технологии. 2015. Т. XXIX. № 10. С. 17–19.
19. Зверева Э.Р., Зуева О.С., Хабибуллина Р.В. Влияние углеродных наноматериалов на реологические характеристики гетерогенных систем // Структура и динамика молекулярных систем: сб. статей XXIII всерос. конф. – Москва: ИФХЭ РАН, 2016. С. 279–288.

20. Zvereva E.R., Khabibullina R.V., Akhmetvalieva G.R., Makarova A.O., Zueva O.S. Influence of Nanoadditives on Rheological Properties of Fuel Oil // *Advances in Engineering Research*. 2017. Vol. 133. P. 914–920
21. Zvereva E.R., Makarova A.O., Khabibullina R.V., Akhmetvalieva G.R., Salikhzyanova D.R., Zueva O.S. The use of carbon nanotubes in the surfactant solution for developing new energy saving technologies // *Proceedings of International Conference on Science and Technology*. – Hanoi, 2016. P. 407–412
22. Zvereva E.R., Zueva O.S., Khabibullina R.V., Makarova A.O. Nanomaterial Effect Study in the Viscosity Characteristics of Fuel Oil and Alternative Fuels Used at Fuel and Energy Complex Enterprises // *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2016. Vol. 11. P. 2950–2954.
23. Jung H.S., Miller A., Park K., Kittelson D.B. Carbon nanotubes among diesel exhaust particles: real samples or contaminants? // *J. Air. Waste Manag. Assoc.* 2013. Vol. 63 (10). P. 1199–1204.
24. Tewari P., Doijode E., Banapurmath N.R., Yaliwal V.S. Experimental Investigations on a Diesel Engine Fuelled with Multiwalled Carbon Nanotubes Blended Biodiesel Fuels // *IJETAE*. 2013. Vol. 3 (3). P. 72–76.
25. Zhang W., Zhang H., Xiao J., Zhao Z., Yua M., Li Z. Carbon nanotube catalysts for oxidative desulfurization of a model diesel fuel using molecular oxygen // *Green Chem.* 2014. Vol. 16. P. 211–220.
26. Selvan V.A.M., Anand R.B., Udayakumar M. Effect of Cerium Oxide Nanoparticles and Carbon Nanotubes as fuel-borne additives in Diesterol blends on the performance, combustion and emission characteristics of a variable compression ratio engine // *Fuel*. 2014. Vol. 130. P. 160–167.
27. Карпушкин Е.А., Беркович А.К., Артемов М.В., Сергеев В.Г. Реологические свойства растворов полиакрилонитрила, содержащих высокодиспергированные углеродные нанотрубки // *Высокомолекулярные соединения. Серия А*. 2014. Т. 56. № 5. С. 553–558.
28. Zvereva E.R., Zueva O.S., Khabibullina R.V. Improvement of Liquid Organic Fuel Oils Operational Characteristics with Additives // *Materials Science Forum*. 2016. Vol. 870. P. 666–670.
29. Zvereva E.R., Khabibullina R.V., Zueva O.S. Nano Additives Influence on Fuel Oil Properties // *Solid State Phenomena*. 2017. Vol. 265. P. 374–378.
30. Basha J.S., Anand R.B. Role of nanoadditive blended biodiesel emulsion fuel on the working characteristics of a diesel engine // *JRSE*. 2011. Vol. 3, 023106.
31. Basha J.S., Anand R.B. The influence of nano additive blended biodiesel fuels on the working characteristics of a diesel engine // *J. Braz. Soc. Mech. Sci.* 2013. Vol. 35. P. 257–264.



32. Gong K., Du F., Xia Z., Durstock M., Dai L. Nitrogen-Doped Carbon Nanotube Arrays with High Electrocatalytic Activity for Oxygen Reduction // *Science*. 2009. Vol. 323. P. 760–764.
33. Yang Z., et al. Sulfur-Doped Graphene as an Efficient Metal-free Cathode Catalyst for Oxygen Reduction // *ACS Nano*. 2012. Vol. 6(1). 205–211.
34. Зверева Э.Р., Дмитриев А.В., Шагеев М.Ф., Ахметвалиева Г.Р. Результаты промышленных испытаний карбонатной присадки к мазуту // *Теплоэнергетика*. 2017. № 8. С. 50–56.
35. Зуева О.С., Макшакова О.Н., Идиятуллин Б.З. и др. Структура и свойства водных дисперсий додецилсульфата натрия с углеродными нанотрубками // *Известия Академии наук. Серия химическая*. 2016. № 5. С. 1208–1215.
36. Зверева Э.Р. и др. Изменение реологических свойств водоугольных суспензий в присутствии наноматериалов // *Вестник Казанского государственного энергетического университета*. 2017. № 3 (35). С. 76–83.
37. Zvereva E.R., Zueva O.S., Khabibullina R.V., Yermolaev D.V., Ahmetvalieva G.R., Salihzyanova D.R., Magdeeva A.M. Environmental safety improvement and composition (water-coal) fuel efficiency increase with various additives at fuel and energy complex enterprises // *International Journal of Pharmacy and Technology*. 2016. Vol. 8 (4). P. 26744–26752.

*Научное издание*

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, МАТЕРИАЛЫ  
И ОБОРУДОВАНИЕ В ЭНЕРГЕТИКЕ

Монография

В трех томах

Том II

ИННОВАЦИОННЫЕ РЕШЕНИЯ И НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

*Под общей редакцией*

*Э.Ю. Абдуллазянова, Э.В. Шамсутдинова*

Редактор *Е.С. Дремичева*

Компьютерная верстка *Т.И. Лунченкова*

Дизайн обложки *Ю.Ф. Мухаметшина*

Подписано в печать 21.12.2018.

Формат 60 × 84/16. Гарнитура «Times». Вид печати РОМ. Бумага ВХИ.

Усл. печ. л. 24,58. Уч.-изд. л. 18,55. Тираж экз. Заказ № 5140

Редакционно-издательский отдел КГЭУ,  
420066, Казань, Красносельская, 51