

Вх. №3/23  
от 28.11.23

МИНОБРАЗОВАНИЯ РОССИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
**ИНСТИТУТ ТЕПЛОФИЗИКИ**  
им. С.С. КУТАТЕЛАДЗЕ  
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
(ИТ СО РАН)

проспект Академика Лаврентьева, 1  
г. Новосибирск, 630090  
Тел.: (383) 330-90-40; 330-84-80; факс 330-84-80  
Эл. почта: director@itp.nsc.ru  
ИНН/КПП 5408100040/540801001  
ОКПО 03534009 ОГРН 1025403648786



УТВЕРЖДАЮ  
Директор Федерального  
государственного бюджетного  
учреждения науки Института  
теплофизики им. С.С. Кутателадзе  
Сибирского отделения Российской  
академии наук академик РАН

  
Д.М. Маркович

от 28.11.2023

№ 15314-01/2023

» 11 2023 г.

на \_\_\_\_\_

от \_\_\_\_\_

### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики имени С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук на диссертацию Сафаргалиева Руслана Фаридовича «Термодинамические условия устойчивости границы раздела «углеводород-графеновый наноплюид», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 «Теплофизика и теоретическая теплотехника»

В диссертационной работе Сафаргалиева Р.Ф. представлены результаты фундаментальных исследований взаимодействия графенового наноплюида и углеводородов с учетом тепловых процессов взаимодействия графеновых наночастиц и молекул углеводородов. Исследования проведены на модельных объектах — химически чистых углеводородах и натуральных объектах — промышленной нефти Самотлорского нефтяного месторождения.

**Объем и структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка использованной литературы из 137 источников, 46 рисунков и 6 таблиц. Объем диссертации: 101 страница.

**Во введении** приведены обоснование актуальности проведения исследования и степень разработанности темы, сформулированы основные цель работы и задачи, показана научная новизна и практическая значимость работы, сформулированы положения, выносимые на защиту, личный вклад

автора в получении результатов работы и приведены сведения об апробации работы, публикациях, структуре и объёме диссертации.

**В главе 1** проведён аналитический обзор работ по физико-химическим методам увеличения нефтеотдачи (МУН). Выполнен обзор публикаций, посвященных применению нанотехнологий в МУН, в частности углеродных наночастиц, таких как углеродные нанотрубки, оксид графена и графен. Показано, что в большинстве исследований преобладают гидродинамические методы описания механизма устойчивости границы раздела фаз (изменение межфазного натяжения, изменение смачиваемости породы), при этом взаимодействие наночастиц с компонентами нефти в работах не учитывалось.

**В главе 2** описаны применяемые в диссертационном исследовании материалы и методология проведения экспериментов.

Материалы, применяемые в исследовании: графеновый нанофлюид, полученный методом ультразвукового диспергирования графеновых наночастиц в дистиллированной воде; подготовленная нефть Самотлорского нефтяного месторождения; карбонатные керны Волго-Уральской нефтегазовой провинции.

Оценка вытесняющей способности полученного нанофлюида проводилась на оригинальной экспериментальной установке, разработанной автором исследования.

Для верификации результатов, полученных на оригинальной установке, были проведены опыты по вытеснению нефти графеновыми нанофлюидами на серийной лабораторной установке ПИК-ОФМ/ЭПЗ, предназначенной для исследования фильтрационно-емкостных свойств и электрических свойств керна, с использованием методики, рекомендуемой ОСТ 39-235-89.

Поскольку вязкость нанофлюида меньше вязкости нефти, гидродинамические методы исследования не позволяют описать механизм формирования переходной области, поэтому автор изготовил оригинальную установку для изучения механизма роста пленки на границе раздела «нанофлюид–углеводород» теплофизическими методами.

Описана методика проведения компьютерного моделирования взаимодействия молекул углеводородов с графеновым листом методами молекулярной механики ММ+.

В главе 3 приведены основные результаты проведенных экспериментов.

Установлено, что при вытеснении нефти графеновым нанофлюидом критическое давление формирования неустойчивости фронта составляет 60 кПа, тогда как для дистиллированной воды это значение равно 10 кПа.

По данным фильтрационных экспериментов, полученным на серийной лабораторной установке ПИК-ОФМ/ЭПЗ, при использовании нанофлюидов наблюдается увеличение доли вытесненной нефти по сравнению с пластовой водой, что согласуется с результатами, полученными с использованием ячейки Хеле-Шоу.

При исследовании формирования пленки на границе раздела «углеводородная жидкость–графеновый нанофлюид» установлены различные режимы её роста, зависящие от температуры системы. Так, при температурах от 0 до 10 °С скорость роста пленки низкая, что приводит к формированию неоднородной пленки, имеющей фрактальную размерность. При температурах от 15 до 60 °С скорость роста существенно увеличивается, в результате чего формируется сплошная однородная пленка. По данным рентгеноструктурного анализа было установлено, что пленка имеет нанокристаллическую упорядоченную структуру из молекул углеводорода и графена. В результате проведенных исследований формирования пленки на границе раздела «углеводородная жидкость–графеновый нанофлюид» были выделены следующие закономерности:

- 1) Образующаяся пленка состоит из графеновых кристаллов и структурированных вблизи их поверхности молекул углеводородов.

- 2) Отмечаются два режима роста пленки — быстрый и медленный. При быстром росте формируется сплошная кристаллическая пленка, что подтверждается результатами рентгеноструктурного анализа. При медленном росте наблюдается фрактальная структура пленки.

Компьютерное моделирование с использованием методов молекулярной механики ММ+ показало формирование упорядоченной структуры из углеводородных молекул вблизи графенового листа.

**В главе 4** предложена физико-математическая модель роста пленки на границе раздела «углеводородная жидкость–графеновый нанофлюид», объясняющая полученные экспериментальные данные.

Физико-математическая модель, предложенная автором, позволяет описать механизм роста пленки и обосновать изменение скорости роста пленки изменением теплообмена на границе раздела «углеводородная жидкость–графеновый нанофлюид».

**В заключении** сформулированы основные результаты.

**Актуальность работы.** Фундаментальные исследования по взаимодействию графеновых нанофлюидов с веществом в большинстве своем посвящены изучению гидродинамических параметров взаимодействия, тогда как теплофизические особенности графенового нанофлюида не учитываются. В печати ежегодно появляются более сотни исследований, демонстрирующих эффективность использования нанофлюидов на основе графеноподобных наночастиц для повышения объема добытой нефти. Повышение нефтеотдачи при закачке нанофлюидов объясняется изменением смачиваемости, снижением межфазного натяжения и изменением вязкости нефти, поэтому знание механизмов взаимодействия графеновых наночастиц с углеводородами с учетом теплофизических свойств нанофлюида является актуальной задачей современной науки — как фундаментальной, так и прикладной.

Применяемые методы воздействия на продуктивные пласты не приносят ожидаемого экономического эффекта. Таким образом, необходимо проводить комплексные фундаментальные исследования по поиску оптимальных методов воздействия на пласт. Одной из основных проблем является неустойчивость фронта вытеснения и образование «вязких пальцев» в пористой среде при заводнении пластов водой. Одним из решений может быть применение нанофлюидов в качестве вытесняющего агента. При

создании технологии вытеснения нефти необходимо проводить детальное изучение взаимодействия графенового нанофлюида с различными углеводородами, содержащимися в нефти. Необходимо обеспечить понимание явлений, происходящих при взаимодействии наночастиц с молекулами нефти как на молекулярном, так и на теплофизическом уровне.

#### **Научная новизна результатов исследования.**

- Впервые показано, что в процессе вытеснения углеводородов (как отдельных видов, так и нефти) графеновым нанофлюидом формируется микрогетерофазное состояние. Формирование микрогетерофазного состояния происходит за счет синергетического процесса тепломассопереноса и эффекта самоорганизации графеновых наночастиц на границе раздела в результате фазового перехода, при этом образуется наноструктурированная кристаллическая пленка, что подтверждается результатами рентгеноструктурного анализа.

- Экспериментально установлено, что при вытеснении углеводородов графеновым нанофлюидом происходит увеличение доли довытесненной нефти по сравнению с водой и снижение объемной доли воды в объеме вытесненной нефти.

- Выделен управляющий параметр скорости роста пленки на границе раздела «углеводородная жидкость–графеновый нанофлюид» — конечная скорость теплоотвода от границы раздела сред. Экспериментально определены два режима роста пленки: а) быстрый теплоотвод — происходит медленный рост пленки, в результате чего пленка получает фрактальную структуру в виде множества Мандельброта, а не дендритов; б) медленный теплоотвод, который приводит к быстрому росту пленки, и в этом случае фрактал не образуется.

- Предложена физико-математическая модель роста пленки на границе раздела «углеводородная жидкость–графеновый нанофлюид», которая учитывает адсорбцию углеводородов на графеновых листах и характерные значения продолжительности остывания пленки в параллельном и перпендикулярном направлениях к вектору скорости кристаллизации.

Результаты расчетов скорости роста с использованием предложенной модели подтверждают достоверность полученных экспериментальных результатов.

**Практическая значимость работы.** Понимание механизмов роста микрогетерофазного состояния на границе раздела «углеводородная жидкость–графеновый нанофлюид» играет ключевую роль в разработке технологии вытеснения нефти графеновым нанофлюидом.

Эффект перегрева границы раздела позволяет управлять как скоростью, так и направлением роста графеновых пленок, например за счет локального разогрева. Таким образом, результаты работы могут способствовать созданию новой технологии нанесения графеновых пленок с управляемой геометрией и структурой.

**Степень достоверности результатов исследования.** Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием современных методик исследования, согласованностью экспериментальных результатов, полученных на оригинальной установке и на серийной лабораторной установке, по исследованию фильтрационно-емкостных свойств кернов по стандартной методике.

Степень достоверности результатов подтверждается совпадением результатов теоретических расчетов в рамках предложенных моделей и полученных экспериментальных данных на оригинальной установке.

По диссертационной работе в целом есть следующие **замечания**:

1. В работе присутствуют ошибки и опечатки. В нескольких случаях автор приводит некорректные формулировки, такие как «уровень pH пласта», «G' постепенно смещается в более высокое положение» и др.
2. В работе не приведены доказательства того, что полученный флюид состоит из графена, а не из оксида графена. Графен, в отличие от неокисленного графена, не формирует устойчивых суспензий в воде без применения ПАВ. Технология приготовления и результаты рентгеноструктурного анализа дают основания полагать, что в материале присутствует оксид графена.

3. Автор утверждает следующее: «Качество получаемого нанофлюида оценивалось при помощи спектрофотометра КФК 3 по коэффициенту пропускания и оптической плотности в различные промежутки времени после синтеза: 1 час 24 часа 72 часа 168 часов», однако он не приводит никаких данных о качестве (стабильности) полученных суспензий.
4. По результатам анализа методом сканирующей микроскопии автор делает вывод о том, что разброс по размеру частиц незначительный, однако разрешение представленного изображения (рисунок 3.6) не позволяет сделать такой вывод.

В целом, представленные замечания не носят принципиального характера, влияющего на структурную целостность работы. Работа выполнена на высоком научном и техническом уровне, представляет собой законченное исследование, достоверность основных результатов не вызывает сомнений.

#### **Заключение.**

Основные результаты научно-квалификационной работы опубликованы в 14 печатных работах, в том числе в 6 работах в изданиях, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, установленный Министерством образования и науки Российской Федерации для представления результатов кандидатских диссертаций, и в них достаточно полно отражены основные результаты диссертационной работы. Результаты были представлены на 9 авторитетных конференциях российского и международного уровня. Автореферат диссертации соответствует содержанию диссертационной работы и отражает ее основные результаты, положения и выводы.

Диссертационная работа Сафаргалиева Руслана Фаридовича по актуальности, научной новизне, научной и практической значимости соответствует требованиям пунктов 9–14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г., предъявляемым к диссертациям на

соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор Сафаргалиев Руслан Фаридович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 «Теплофизика и теоретическая теплотехника».

Отзыв на диссертацию подготовлен на основании положительного заключения секции № 4 «Космическая энергетика, разреженные газы, плазма, микро- и наносистемы» Ученого совета Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт теплофизики имени С.С. Кутателадзе» Сибирского отделения Российской академии наук (Протокол № 5-2023 заседания Секции №4 Учёного совета ИТ СО РАН от 23 октября 2023).

Отзыв подготовил:  
Заведующий лабораторией синтеза  
новых материалов ФГБУН ИТ СО РАН  
д.ф.-м.н. по специальности 1.3.14  
«Теплофизика и теоретическая теплотехника»

Смовж Дмитрий Владимирович

630090, г. Новосибирск,  
проспект Академика Лаврентьева, д. 1  
Тел.: +7 (383) 316-53-32  
e-mail: [smovzh@itp.nsc.ru](mailto:smovzh@itp.nsc.ru); [dsmovzh@gmail.com](mailto:dsmovzh@gmail.com)  
2023 г.

Подпись Д. В. Смовжа удостоверяю:  
Ученый секретарь ИТ СО РАН,  
Кандидат физико-математических наук  
по специальности 01.04.14 «Теплофизика  
и теоретическая теплотехника»



М.С. Макаров

*Сведения об организации*  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт теплофизики имени С.С. Кутателадзе» Сибирского отделения Российской академии наук  
Адрес: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, д. 1  
Телефон: +7 (383) 330-70-50. E-mail: [director@itp.nsc.ru](mailto:director@itp.nsc.ru). Web-сайт:  
<http://www.itp.nsc.ru>.