



Society of Petroleum Engineers

**SPE-201879-RU**

## **Опыт применения физических полей для ускорения процесса промышленной подготовки нефти**

Алексей Викторович Деньгаев а также Владимир Сергеевич Вербицкий, РГУ нефти и газа, НИУ, имени И.М. Губкина; Андрей Александрович Геталов а также Борис Викторович Саргин, ООО «НПО «Волна»; Иван Викторович Грехов, ПАО «Газпромнефть НТЦ»; Александр Владимирович Богданов, ПАО «Газпромнефть»; Сергей Алексеевич Тарасевич, ПАО «Газпромнефть НТЦ»

Авторское право 2020, Общество инженеров нефтегазовой промышленности

Данная статья была подготовлена для презентации на Российской нефтегазовой технической конференции SPE, которую изначально должна была пройти 12-14 октября 2020 года (Москва, Россия). В связи с эпидемиологической ситуацией в мире, вызванной COVID-19, мероприятие было перенесено на 26-29 октября 2020 года, формат конференции изменен на виртуальный. Официальные материалы конференции были опубликованы для онлайн-доступа 26 октября 2020 года.

Данная статья была отобрана Программным комитетом SPE для представления на конференции на основе информации, содержащейся в представленном авторами реферате. Экспертиза содержания статьи Обществом инженеров нефтегазовой промышленности не выполнялась, внесение исправлений и изменений является обязанностью и ответственностью авторов. Материал в том виде, в котором он представлен, не обязательно отражает точку зрения SPE, его должностных лиц или членов Общества. Электронное копирование, распространение или хранение любой части данной статьи без предварительного письменного согласия SPE запрещается. Разрешение на воспроизведение в печатном виде распространяется только на реферат объемом не более 300 слов; при этом иллюстрации копировать не разрешается. Реферат должен содержать явно выраженную ссылку на авторское право SPE.

---

### **Резюме**

Разделение водонефтяных эмульсий на промыслах составляет существенную часть расходов, связанных с добычей и транспортировкой скважинной продукции. Главным образом это связано с применением химических реагентов (деэмульгаторов), которые ускоряют процесс разделения эмульсии. В работе предложено технологическое решение по способу ввода микродоз деэмульгатора, позволяющее сократить концентрацию вводимого реагента и что наиболее важно сократить объем промежуточного слоя в процессе промышленной подготовки нефти. Предложенное устройство основано на использовании ультразвуковых колебаний.

В лаборатории, и в последствии в промысловых условиях проведены испытания в которых определялась эффективность разделения в зависимости от типа эмульсий, вязкости нефти, температуры, мощности излучателя, наличия деэмульгатора и т.д.

Полученные результаты позволяют говорить о возможном сокращении объемов используемых деэмульгаторов, а также повышения эффективности подготовки нефти.

### **Введение**

Организация эффективного процесса добычи, подготовки и переработки нефти, оптимизация существующих процессов, обеспечивающих улучшение технико-экономических показателей и качества товарной нефти (Филиппова Т.В. 2016), являются актуальными задачами для мировых нефтяных компаний при эксплуатации месторождений.

В качестве одной из практических задач, требующих решения, является не только снижение нормы ввода деэмульгатора при разделении скважинной продукции, но и стабилизация так называемого промежуточного слоя (ПС), представляющего из себя стойкий слой водонефтяных эмульсий на

границе «вода – нефть» в процессе промышленной подготовки нефти (Кронин А.Н., 2013; Филиппова Т.В., 2016; РД 39-0148311-605-86).

На настоящий момент на рассматриваемом объекте установки подготовки нефти (УПН) средний расход деэмульгатора на потоке полного цикла составляет ~38 – 40 гр/тонну (~ 160 кг/сутки) деэмульгатора типа СНПХ 4460. При этом наблюдается достаточно нестабильный уровень промежуточного слоя (ПС) в резервуарах РВС. Поставленная задача состоит не только в снижении нормы ввода деэмульгатора на 20%, до уровней ~ 30 гр/тонну (~ 120 кг/сутки), но и в повышении стабилизации уровня промышленного слоя при изменении входного потока водонефтяной эмульсии со стороны фонда добывающих скважин.

## Аудит промышленной системы подготовки нефти на действующем объекте

Известно, что эффективность действия деэмульгатора на расслоение водонефтяных эмульсий существенно зависит от двух факторов: содержания водной фазы и степени ее дисперсности (Исмайылов Г.Г. и др. ав., 2017). Учитывая фактор обводненности, который составлял на момент проведения промышленных испытаний (декабрь 2019 г.) уровень 50-52% и является относительно медленно растущей величиной, что основным исследуемым параметром должна быть структура водонефтяной эмульсии (ВНЭ) (Левченко Д.Н. и др. ав., 1967; Деньгаев А.В. и др. ав., 2018, 2020).

С этой целью проведены исследования структуры скважинной продукции, поступающей на вход установки подготовки нефти (УПН) и на выходе из печей типа ПТБ-10А перед их транспортировкой в РВС. На [рисунке 1](#) представлена микрофотография структуры входной ВНЭ во входной магистральной трубе УПН-1.

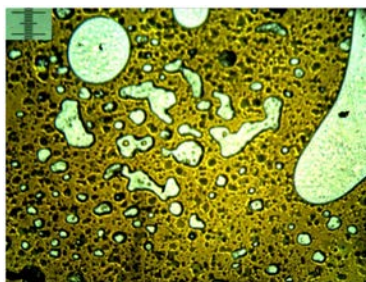


Рисунок 1—Структура входной водонефтяной эмульсии в магистральной трубе установки подготовки нефти

Фиксация структуры осуществлялась с помощью оптических микроскопов с объективами  $\times 4$ ,  $\times 10$ ,  $\times 40$  крат и цифровой насадки DCM500 (5 Мпкс) при помощи специализированной программы ScopeFoto. Калибровка осуществлялась для каждого объектива с помощью объект-микрометра с шагом сетки 10 мкм.

На [рисунке 1](#) (калибровочная сетка шаг 10 мкм) хорошо видны глобулы воды различного размера, примеси (идентифицируются как механические примеси и асфальто-смолистые отложения (АСО)), также обращает на себя наличие бронирующих оболочек на границе фаз нефть-вода. Отметим, что отложения механических примесей и асфальто-смолистых отложений являются весьма существенными факторами, стабилизирующими промежуточный слой (Карпенко И.Н. и др. ав., 2017). На [рисунке 2](#) представлено распределение по размерам глобул воды.

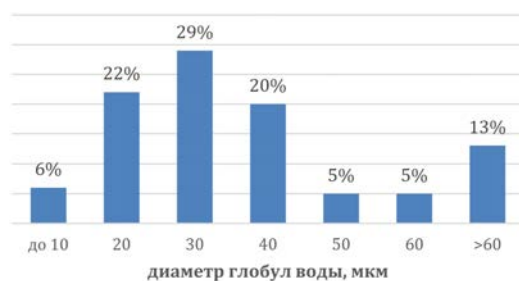


Рисунок 2—Распределение по размерам глобул воды в исходной ВНЭ

Анализ размеров глобул воды в продукции, поступающей на УПН показывает, что ~ 60% от общего количества имеют характерный размер 30 мкм и менее. Такая мелкодисперсная структура водяных глобул является дополнительным, к существенному количеству механических примесей и асфальто-смолистых отложений, стабилизирующим фактором промежуточного слоя. На [рисунке 3](#) показаны микрофотографии с увеличенным разрешением, полученным при использовании объективов x10 и x40 крат.

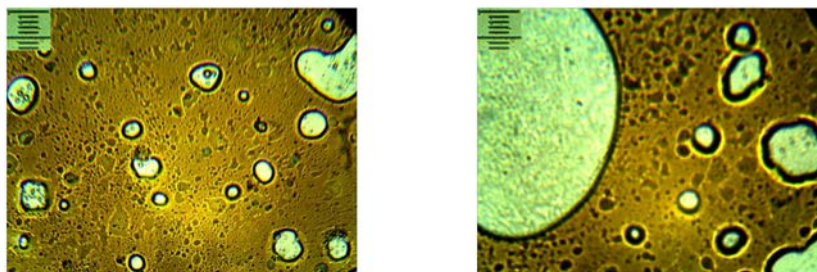


Рисунок 3—Структура ВНЭ при увеличении объективами x4, x10 крат, соответственно

Более детальная визуализация показывает, что размеры механических примесей и асфальтосмолистых отложений имеют еще более мелкую дисперсность, чем глобулы воды.

Следующим этапом изучения структуры поступающей эмульсии является анализ проб после введения деэмульгатора СНПХ 4460 в и первичного водоотделения. Данная проба была отобрана после газовых сепараторов (НГС). Кинетика водоотделения показала, что в течение 20 минут при температуре, равной температуре входной ВНЭ, происходит выпадение только 2/3 глобул воды от общего объема воды, самых крупных по размеру, то есть ~ 37% от общего водосодержания (50-52%).

Микрофоторграфии структуры ВНЭ полученные после фазы первичного водоотделения при вводе деэмульгатора СНПХ 4460 показаны на [рисунке 4](#).

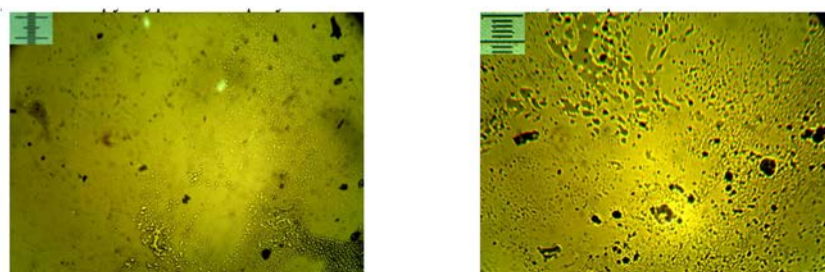


Рисунок 4—Структура ВНЭ при увеличении объективами x4, x10 крат после ввода деэмульгатора перед нагревом в печах

В продукции осталось существенное количество механических примесей и асфальто-смолистых отложений.

Содержание воды в эмульсии существенно снизилось, то есть первая «быстрая» фаза работы деэмульгатора способствовала выпадению самых крупных глобул воды, которые в объеме составили ~ 67% (2/3) от общего водосодержания. Это привело к перераспределению размеров оставшихся глобул воды (рисунок 5) в зону более мелких включений.

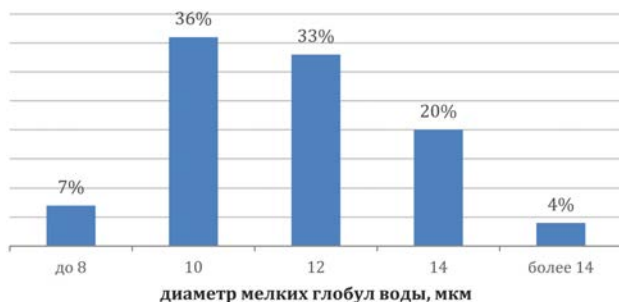


Рисунок 5—Распределение глобул воды после первичного водоотделения

Основная доля глобул воды имеет размер 10-14 мкм. Как известно, глобулы размером менее 20 мкм попадают в категорию самых мелкодисперсных и трудноосаждаемых включений. Напомним, что в данной мелкодисперсной категории осталось ~ 30-33% исходного количества воды.

Следующим технологическим этапом является нагрев поступающей ВНЭ в печах типа ПТБ-10А. Особенностью печей ПТБ-10А является отсутствие водяной рубашки у змеевика с проходящей ВНЭ, что приводит к локальным перегревам эмульсии. На рисунке 6 показана микрофотография ВНЭ с максимальным увеличением на объективе х40.

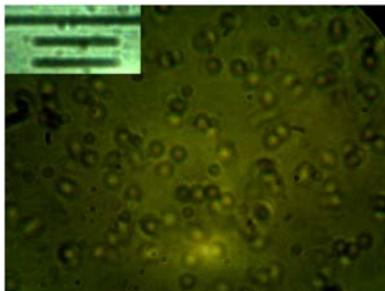


Рисунок 6—Структура ВНЭ после прохождения нагрева в печах ПТБ 10А

Видно, что глобулы воды после термической обработки не только не подверглись слиянию, а, наоборот, приобрели более мелкодисперсную структуру. Это наглядно видно на графике (рисунок 7), полученного после обработки микрофотографии (рисунок 6).

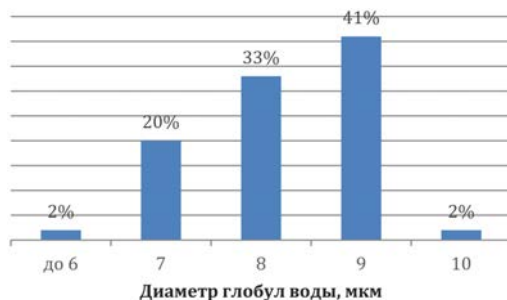


Рисунок 7—Распределение глобул воды после печей нагрева



Практически все глобулы сосредоточены в диапазоне до 10 мкм. Это является подтверждением того, что применяемый деэмульгатор СНПХ4460 эффективно приводит к выпадению только относительно крупных водяных глобул (30 мкм и более), а мелкие глобулы воды остаются в эмульсии длительное время, даже после термического нагрева. На микрофотографиях так-же видно, что многие глобулы воды имеют защитные бронирующие оболочки.

Таким образом, нестабильность промежуточного слоя на рассматриваемом объекте с полным циклом подготовки нефти вероятнее всего является следствием нескольких факторов: большой долей содержания в ВНЭ мелких глобул воды (менее 30 мкм), большим количеством механических примесей и асфальтосмолистых отложений, не оптимальной временной синхронизацией действия деэмульгатора СНПХ4460 от точки ввода по этапам технологического цикла. Полученные пробы перед газовым сепаратором (НГС) указывали на существенную долю отделившийся воды после ввода деэмульгатора. По имеющемуся опыту работы и данным литературы (Усова Л.Н. и др.ав., 2007) последний фактор является весьма существенным.

## Предлагаемое решение

Проведенный анализ структуры ВНЭ позволяет сформулировать требования к показателям дисперсности при вводе деэмульгатора. Обычный способ ввода деэмульгатора путем его подачи через трубную врезку от дозирующего плунжерного насоса в магистральную трубу является простым с точки зрения эксплуатации, но не самым эффективным. Размер капель вводимого деэмульгатора должен быть равен, либо меньше глобул воды (Соруш Ахмади, 2018). Энергия и гидродинамика входного потока ВНЭ способствует дроблению капель деэмульгатора на более мелкие частицы, но имеет физическое ограничение, зависящее от многих факторов.

Для решения поставленной задачи, одним из этапов, является создание эффективного способа и устройства ввода деэмульгатора (с дисперсностью до 20-30 мкм) типа «жидкость-жидкость» и обоснование места его установки с учетом имеющихся технологических этапов подготовки нефти. Данная постановка задачи может быть отнесена к классу задач «затопленная струя» (Абрамович Г.Н., 2011) и эффективному распылению жидкостей (Дитякин Ю.Ф. и др.ав., 1977; Пажи Д.Г. и др.ав., 1984). Подавляющее большинство технических решений, приводящих к получению мелкодисперсного распыления жидкости – химреагента ввода основано на создании двухфазного потока, то есть помимо жидкости требуется высокоинтенсивная струя газа. Именно энергия струи газа способствует дроблению жидкости в мелкодисперсное состояние. В качестве распыливающих устройств в этом случае применяются различные форсунки. Так для получения дисперсности жидкой фазы ~ 20 мкм, требуется скорость газового потока ~ 250-300 м/с (Пажи Д.Г. и др.ав., 1984) и диаметр соплового отверстия ~ 0,4 мм. В случае с вводом деэмульгатора через форсунки введение дополнительного газового потока меняет всю технологию подготовки нефти, что недопустимо. Практика использования форсунок так-же показала их эксплуатационный недостаток- это засорение соплового отверстия.

Альтернативным методом и предложенного авторами данной статьи распыливания жидкости является использование ультразвуковых систем (Хмелев В.Н. и др.ав., 2010; Патент РФ №2441490).

Конструктивно (рисунок 8) ультразвуковой (УЗ) точечный диспергатор (СМАРТ) состоит из корпуса 1, где расположен пьезоэлектрический возбудитель УЗ колебаний, волновода с внутренним каналом подачи деэмульгатора, который через лубрикатор 2 и клиновидную задвижку 3 (устанавливается методом холодной врезки), опускается в магистральную трубу до упора с нижней внутренней часть трубы, на конце волновода расположена распылительная головка 4 (распылитель). Так-же ультразвуковой диспергатор имеет системы очистки и подачи деэмульгатора, контроля давления, питание осуществляется от генератора УЗ частоты по двухпроводной линии. Внутренний

объем корпуса заполнен трансформаторным маслом для отвода тепла от пьезоэлектрического возбуждателя УЗ колебаний и обеспечения электро взрывобезопасности.



Рисунок 8—Структурная схема установки ультразвукового диспергатора

Принцип работы распылительной головки основан на создании избыточного давления в жидком деэмульгаторе между пластинами, совершающими относительные микроколебания с ультразвуковой частотой.

Как показывают проведенные расчеты (Попов В.С. и др. ав., 2011), избыточное давление может достигать  $\sim 2$  атм, при условии колебаний только одной стенки. В нашем случае этот эффект усиливается за счет звукокапиллярного эффекта с кавитацией (Розина Е.Ю., 2003) и при добавлении изгибных колебаний пластин распылителя (Ильгамов М.А., 2018).

Настройка распылителя осуществляется на расход жидкости, равной планируемому расходу деэмульгатора с учетом планового уменьшения подачи. Для этого разработан испытательный стенд, включающий в себя плунжерный подающий насос с регулируемой подачей, расходомер, измеритель давления в нагнетающей магистрали, измерительную планку для замера размеров факела распыла и получения характеристик дисперсности. На [рисунке 9](#) показаны в последовательные моменты времени фотографии при диспергации системы «масло-вода». Выбор моторного масла основан на добавленной, по отношению к деэмульгаторам, вязкости продукта. Аналогичные испытания проведены для других систем, например, «вода-дизельное топливо».

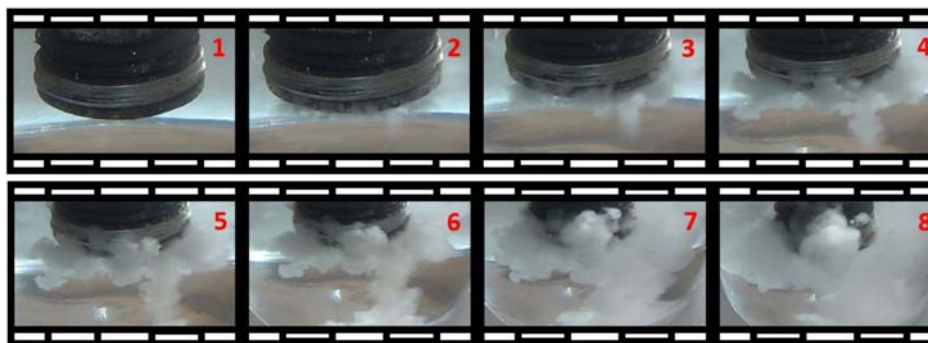


Рисунок 9—Факел распыла УЗ-диспергатора при диспергации системы «масло-вода»

На [рисунке 10](#) представлена микрофотография структуры и зависимость распределения частиц по размерам.

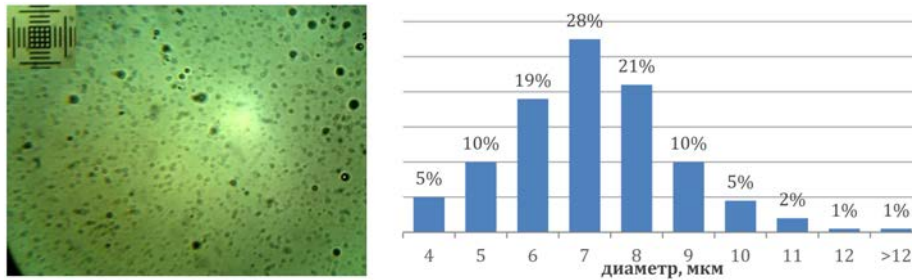


Рисунок 10—Микрофотография структуры УЗ распыления и распределение капель диспергируемой жидкости (масло) по размерам

По всей совокупности проведенных экспериментов можно отметить, что дисперсность частиц вводимой жидкости (химреагента) не превышает  $\sim 15$  мкм при различных физико-химических характеристиках жидких сред и диапазона температур 10-50 °С. Конструкция распылителя предусматривает получение различных расходных характеристик (л/мин) при заданном уровне дисперсности.

Таким образом, предлагаемая конструкция ультразвукового точечного диспергатора (СМАРТ) обеспечивает параметры ввода деэмульгатора на установке подготовки нефти (УПН), сопоставимые с размерами водяных глобул ВНЭ как на входе объекта, так и на всех последующих этапах технологической подготовки.

## Выводы

Проведенный анализ структуры ВНЭ, поступающей на цикл полной подготовки нефти на действующем объекте (УПН) показывает на ряд факторов, способствующих возникновению стабильного, существенного по объему и недостаточно прогнозируемого промежуточного слоя (ПС). В эти факторы входят - большая доля содержания в ВНЭ мелких глобул воды (менее 30 мкм), большим количеством механических примесей и асфальтосмолистых отложений (дополнительный источник стабилизации ПС), не оптимальной временной синхронизацией действия деэмульгатора от точки ввода по этапам технологического цикла. Предлагается вводить деэмульгатор с помощью УЗ диспергатора, обеспечивающего дисперсность вводимого деэмульгатора на уровне самых мелких глобул воды (до 15 мкм) в поток ВНЭ на входной магистральной трубе. Результаты предполагается получить в ходе выполнения ОПИ на объекте в ближайшее время.

## Благодарность

Благодарность выражается специалистам компании ПАО «Газпромнефть» в формулировке практических задач лабораторных и промысловых исследований.

Также благодарим руководство и научных сотрудников кафедры разработки и эксплуатации нефтяных месторождений РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина за консультационную поддержку при выполнении проекта.

## Условные обозначения

- ПС* промежуточный слой
- РВС* резервуар вертикальный стальной
- ВНЭ* водонефтяная эмульсия
- УПН* установка подготовки нефти
- ПТБ* печь трубная блочная
- АСО* асфальто-смолистые отложения
- НГС* нефтегазовый сепаратор

УЗ ультразвук  
ОПИ опытно промышленные испытания  
ПНГ попутно нефтяной газ

## Список литературы

1. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй. Москва, ЭКОЛИТ, 2011.
2. Деньгаев А.В., Геталов А.А., Вербицкий В.С., Фархутдинов М.С. Применение акустических методов разделения водонефтяных эмульсий, *SeSja III Nowetechiki I technologiciew zastosowaniu do nietypowych 651 ZŁÓŻ* Weglowodorow, Geopetrol, 2018.
3. Деньгаев А.В., Вербицкий В.С., Мищенко И.Т., Геталов А.А., Саргин Б.В., Грехов И.В., Богданов А.В., Тарасевич С.А. Перспективы использования ультразвукового воздействия в процессе подготовки нефти на Приобском месторождении. Нефтяное хозяйство, 2020, №4.
4. Дитякин Ю.Ф., Клячко Л.А., Новиков Б.В., Ягодкин Б.И. Распыливание жидкостей, Москва, Машиностроение, 1977.
5. Ильгамов М.А. Изгибные колебания пластины при изменении среднего давления на ее поверхностях. Акустический журнал, 2018, том 64, № 5: с. 598–604
6. Исмайылов Г.Г., Избасаров Е.И., Адыгезалова М.Б., Халилов Р.З. Исследование влияния реагентов-деэмульгаторов на кинетику обезвоживания реологически сложной нефти, Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2017, том 16, №2: с. 138–147.
7. Карпенко И.Н., Коновалов В.В., Рукина П.В. Повышение эффективности подготовки нефти совместным выделением механических примесей и асфальтенов из промежуточных слоёв, Нефтегазовое дело, 2017.
8. Кронин А.Н. Изучение процесса образования стойких промежуточных слоев при разрушении водонефтяных эмульсий в системе подготовки скважинной продукции нефтяных месторождений, РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, Москва, 2013.
9. Левченко Д.Н., Бергштейн Н.В., Худякова А.Д., Николаева Н.М. Эмульсии нефти с водой и методы их разрушения. Изд-во Химия, Москва, 1967.
10. Пажи Д.Г., Галустов В.С. Основы техники распыливания жидкостей, Изд-во Химия, Москва, 1984.
11. Патент РФ №2441490 Способ ультразвуковой кавитационной обработки жидких сред и расположенных в среде объектов, патентообладатель ООО "НПО "Волна", 08-07-2016 г.
12. Попов В.С., Агеев Р.В., Волов М.И. Гидроупругие колебания стенок канала со слоем вязкой жидкости, установленного на вибрирующем основании. Фундаментальные проблемы теоретической и прикладной механики Вестник Нижегородского университета им. Лобачевского Н.И., 2011, № 4 (5): с. 2433–2435
13. РД 39-0148311-605-86. Унифицированные технологические схемы сбора, транспорта и подготовки нефти, газа и воды нефтедобывающих районов, Куйбышев, 1986.
14. Розина Е.Ю. Кавитационный режим звукокапиллярного эффекта. Акустический вестник, 2003, том 6 N 1: с. 48 – 59.
15. Соруш Ахмади. Прогнозирование технологических параметров процесса обезвоживания и обессоливания тяжелых высоковязких нефтей с применением математического моделирования, Кандидатская диссертация, РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 2018.
16. Усова Л.Н., Миннигалимов Р.З., Сафонов В.Е., Голубев М.В. Обоснование выбора рациональных точек подачи деэмульгатора в добываемую жидкость при путевом сбросе воды, Нефтегазовое дело, 2007.



17. Филиппова Т.В. Моделирование процесса каплеобразования при промышленной подготовке нефти Приобского месторождения // Химия и химическая технология в XXI веке: материалы XVII Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых имени профессора Л.П. Кулёва: в 2 т. – Томск: ТПУ, 2016.
18. Филиппова Т.В. Моделирование процессов разрушения водонефтяных эмульсий при промышленной подготовке нефти, Магистерская диссертация, ТПУ, Томск, 2016.
19. Хмелев В.Н., Сливин А.Н., Барсуков В.Н., Цыганок С.Н., Шалунов А.В. Применение ультразвука высокой интенсивности в промышленности, АГТУ им. И.И.Ползунова, Бийск, 2010.