

**Казанский Федеральный Университет**

**Кафедра технологии нефти, газа и углеродных материалов**

**Kazan Federal University,**

**Department of oil & gas technology and carbon materials**

**Монография. Применение волновых технологий для интенсификации добычи тяжелой нефти в условиях высокой вязкости и парафинизации**

**Monograph. Application of wave technologies to intensify the production of heavy oil under conditions of high viscosity and waxing**

**Алфаяд Ассим Гани Хашим, Alfayyadh Assim Gheni Hashim <sup>1</sup>**

**Кемалов Руслан Алимович, Kemalov Ruslan Alimovich <sup>2</sup>**

**Кемалов Алим Фейзрахманович, Kemalov Alim Feizrahmanovich <sup>3</sup>**

аспирант кафедры технологии нефти, газа и углеродных материалов <sup>1</sup>

кандидат технических наук,

доцент кафедры технологии нефти, газа и углеродных материалов <sup>2</sup>,

доктор технических наук, профессор, академик РАН <sup>3</sup>

заведующий кафедрой технологии нефти, газа и углеродных материалов

Казань, Россия

УДК 665.5-405. Шифр научной специальности ВАК:

2.8.4 Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений

E-mail: [assemalfayad@gmail.com](mailto:assemalfayad@gmail.com)<sup>1</sup>, [kemalov@mail.ru](mailto:kemalov@mail.ru)<sup>2</sup>, [alim.kemalov@mail.ru](mailto:alim.kemalov@mail.ru)<sup>3</sup>

**Аннотация:** В данной работе исследуется влияние волновых процессов на реологические свойства тяжелой нефти. Используя комплексный подход, включающий математические расчеты и экспериментальные данные, анализируется, как ультразвуковое и гидродинамическое воздействие могут изменять вязкость и структуру тяжелых нефтяных смесей. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации процессов добычи и транспортировки тяжелой нефти.

**Abstract:** This work examines the influence of wave processes on the rheological properties of heavy oil. Using an integrated approach, including mathematical calculations and experimental data, it is analyzed how ultrasonic and hydrodynamic effects can change the viscosity and structure of heavy oil mixtures. The

results obtained can be used to optimize the processes of production and transportation of heavy oil.

**Ключевые слова:** импульсно-волновое воздействие, призабойная зона пласта, волновые методы, скважина, фильтрация.

**Keywords:** pulse-wave impact, bottomhole formation zone, wave methods, well, filtration.

## 1. ВВЕДЕНИЕ (INTRODUCTION)

Тяжелая нефть, обладающая высокой вязкостью и сложным составом, представляет значительные технологические и экономические вызовы для нефтяной промышленности. Эксплуатация месторождений с тяжелой нефтью часто связана с повышенными затратами на добычу, транспортировку и переработку из-за ее специфических свойств. Поэтому разработка новых технологий, позволяющих эффективно изменять реологические свойства тяжелой нефти, является актуальной задачей для нефтегазового сектора.

Одним из перспективных направлений для решения данной проблемы является применение волновых технологий, таких как ультразвуковое и гидродинамическое воздействие. Эти методы позволяют изменять структуру и свойства нефтяных смесей, что может привести к существенному улучшению их текучести и снижению вязкости.

Ультразвуковое воздействие основано на использовании механических колебаний высокой частоты, которые способны вызывать дезагрегацию асфальтенов и смол, а также изменять микроструктуру нефтяной эмульсии. Гидродинамическое воздействие, в свою очередь, основано на создании оптимальных условий для перемешивания и распределения компонентов нефти, что также может привести к изменению ее реологических свойств.

Применение волновых технологий в нефтяной промышленности имеет ряд преимуществ. Во-первых, они позволяют существенно снизить вязкость тяжелой нефти, что улучшает условия ее добычи и транспортировки. Во-вторых, эти методы могут быть применены на различных стадиях нефтедобычи, от разработки месторождений до переработки нефти на нефтеперерабатывающих

заводах. В-третьих, волновые технологии могут быть реализованы с использованием существующего оборудования, что снижает затраты на внедрение новых технологий [1-4].

Однако, несмотря на перспективы применения волновых технологий в нефтяной промышленности, существует ряд ограничений и вызовов, которые необходимо преодолеть. В частности, требуется проведение дополнительных исследований для определения оптимальных параметров воздействия, а также оценки долгосрочного влияния на качество и свойства нефти. Кроме того, необходимо учитывать экономическую целесообразность и экологические аспекты внедрения данных технологий [1].

В целом, применение волновых технологий для изменения реологических свойств тяжелой нефти представляет собой перспективное направление для нефтяной промышленности. Однако, для успешного внедрения этих технологий необходимо проведение комплексных исследований, включающих теоретический анализ, экспериментальные исследования и моделирование процессов.

## **2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ (MATERIALS AND METHODS)**

Исследование включает два основных этапа: теоретический анализ и экспериментальное исследование. В теоретической части работы используются модели реологии нефтяных смесей, описывающие их поведение под воздействием внешних сил. Экспериментальная часть включает проведение серии испытаний с использованием ультразвуковых и гидродинамических установок для обработки образцов тяжелой нефти. Измеряются изменения вязкости, структуры и других реологических параметров до и после воздействия.

Если в сплошной среде – газах, жидкостях или твёрдых телах – частицы среды окажутся выведенными из положения равновесия, то упругие силы, действующие на них со стороны других частиц, будут возвращать их в положение равновесия. При этом частицы будут совершать колебательное движение. Распространение упругих колебаний в сплошной среде представляет собой волнообразный процесс. Колебания с частотой от единиц до 20 Гц называются

инфразвуковыми, при частоте от 20 Гц до 16–20 кГц колебания создают слышимые звуки. Ультразвуковые колебания соответствуют частотам от 16–20 кГц до 108 МГц, а колебания с частотой более 108 МГц получили название гиперзвуков [13-17].

Физическая природа упругих колебаний одинакова во всем диапазоне частот. Для понимания природы упругих колебаний рассмотрим их свойства. Форма волны – это форма волнового фронта, т.е. совокупности точек, обладающих одинаковой фазой. Колебания плоскости создают плоскую звуковую волну, если излучателем служит цилиндр, периодически сжимающийся и расширяющийся по направлению своего радиуса, то возникает цилиндрическая волна. Точечный излучатель, или пульсирующий шарик, размеры которого малы по сравнению с длиной излучаемой волны, создает сферическую волну.

Вследствие кавитации пузырьки микронных размеров образуют и растут из-за чередования положительных и отрицательных волн давления в растворе. Пузыри, подвергнутые этим переменным волнам давления, продолжают расти до тех пор, пока они не достигнут резонансного размера. Как раз перед пузырьковой имплозией, существует огромное количество энергии, хранящейся внутри самого пузыря [10].

Связь между перепадом давления в пузырьке и перепадом температуры, необходимой для формирования пузырька, выражается формулой [2].

$$\Delta T = \frac{\Delta p \cdot \Delta n}{\Delta H \cdot d_n} \quad (1)$$

где  $\Delta H$  — скрытая теплота фазового перехода;  $d_n$  — плотность пара;  $\Delta p$  — капиллярное давление.

Отсюда следует, что температура внутри пузырька (которая всегда выше, чем температура насыщения пара при давлении  $p$ ) может быть определена как температура насыщения, соответствующая давлению  $p \setminus - p \setminus - \Delta p$ . Таким образом, чем меньше размер пузырька, тем на большую величину надо перегреть жидкость, чтобы ее превратить в пар. В этом случае затрачивается минимальная работа для образования пузырька [3].

Температура внутри кавитирующего пузырька может быть чрезвычайно высокой при давлении до 500 атм. Процесс схлопывания, когда он происходит

вблизи твердой поверхности, превращает пузырь в струю примерно на одну десятую размера пузырька, которая движется со скоростью до 400 км/ч к твердой поверхности. Благодаря сочетанию давления, температуры и скорости струя освобождает загрязняющие вещества от их связей с подложкой. Из-за небольшого размера струи и относительно большой энергии ультразвуковая очистка обладает способностью проникать в небольшие щели и эффективно удалять захваченные отложения [3].

В работе [1] показано, что если образец раствора асфальтенов, в котором идет процесс агрегации, подвергнуть перемешиванию или ультразвуковому диспергированию, то можно разрушить образовавшиеся к этому времени асфальтеновые агрегаты до размеров, с которых начинался рост этих агрегатов, фиксируемый методом динамического рассеяния света (ДРС). При этом разрушенные агрегаты стремятся снова к ассоциации.

## **2.1 Изменение реологических характеристик пластовой жидкости в акустическом поле**

Одним из эффектов, который наблюдался экспериментально в акустическом поле интенсивностью 8–100 кВт/м<sup>2</sup>, является изменение вязкости свободной нефти [1]. Снижение вязкости достигает 20–30 % и объясняется разрушением циклических структур за счёт интенсивных колебательных процессов, а также нагревом нефти и содержащихся в ней парафинов, вызванным диссипацией акустической энергии.

В работе [2] предложено использование УЗ и микроволновых эффектов для удаления асфальтенов и парафинов, которые выпадают из сырой нефти и прилипают к стволу горизонтальных скважин. Зависимость вязкости трёх жидкостей от времени УЗО (30–120 с) показало следующее: вязкость сырой нефти и асфальтенов уменьшается до 60 с УЗО, а затем начинает увеличиваться; после УЗО вязкость парафинов уменьшается до 30 с, а затем также начинает увеличиваться. Авторы объясняют это двумя противодействующими факторами: по мере увеличения времени УЗО температура увеличивается, что приводит к снижению вязкости. Однако по мере увеличения времени УЗО происходит

переориентация молекулярных структур и вязкость начинает расти. Кроме того, УЗО в течение 20 с позволяет удерживать частицы во взвешенном состоянии в суспензии, что не даёт частицам осаждаться на насосно-компрессорных трубах (НКТ) [10].

В работе [1] было проведено изучение влияния микроволновых (МВ) и УЗ волн на свойства тяжелой нефти Юго-западных нефтяных месторождение Ирана. Результаты экспериментов показывают, что в образцах при СВЧ-излучении в течение 5, 10, 15 и 20 мин протекают разные процессы. При MW в течение 5 и 10 минут вязкость снизилась с 15,836 мПа.с до 12,234 мПа.с и 11,122 мПа.с соответственно. Это происходит из-за увеличения объема с уменьшением загустителя и высокой абсорбционной способностью тяжелых молекул нефти по отношению к молекулярной массе, которая заряжает процесс крекинга.

Тяжелая нефть, использованная в этом исследовании [2], была получена из коллектора Юго-западе Ирана. Насыщенность, ароматические соединения, смолы (ASTM D-4124) и асфальтены (IP-143) в тяжелых нефтях были определены с помощью экспериментов SARA. Начало осаждения асфальтенов в сырой нефти измеряли с помощью вискозиметр с различным процентным содержанием н-гептана [1-10]. Измеренное начало происходило при смеси сырой нефти и Н-гептана, измеренной с помощью вискозиметра, в 26 об. % Н-гептана и 79 об. % сырой нефти. 150 мл сырой нефти и образец, содержащий 26 об. % Н-гептана и 79 об. % Сырой нефти, подвергали воздействию волн МВ и УЗ в течение 5, 10, 15 и 20 минут. Причина остановки через 20 минут заключается в том, что по истечении этого периода значения измеряемых компонентов оставались почти постоянными. Образцы подвергались воздействию СВЧ с различной продолжительностью времени при частоте 2450 МГц и мощности 400 Вт. Образец подвергался воздействию ультразвукового излучения с частотой 20 кГц и мощностью 400 Вт в различных временных диапазонах. Облученное масло охлаждали в течение одного дня при температуре окружающей среды, чтобы дать ему возможность стабилизироваться. После завершения микроволнового и ультразвукового облучения в течение заданного интервала времени они охлаждались и измеряли вязкость при стандартной температуре (25

°С). После перемешивания раствора требуется время, чтобы образовалась оболочка. Четыре капли образцов наблюдаются с помощью микроскопа с кратным увеличением. Оптический поляризационный микроскоп состоит из видеокамеры с высоким разрешением, ПК, монитора изображений с высоким разрешением, а изображения сохраняются в пикселях с высоким разрешением. Растворы излучались СВЧ- и УЗ-излучениями в течение разных интервалов времени [1-10].

В работе [15] исследовали влияния УЗО на структурно-механические свойства нефтей различного компонентного состава. В результате, при обработке малопарафинистой высокосмолистой нефти (МПВСН) с высоким содержанием асфальтенов в течение 2 мин происходит снижение вязкости в 1,4 раза и температуры застывания на 5 °С.

В группе парафинистых высокосмолистых нефтей (ПВСН) с содержанием смолисто-асфальтеновых компонентов (САК) 19-29 % мас. наблюдается изменение вязкостно-температурных характеристик при рациональном времени обработки:

- вязкость снижается в 1,3-3,2 раза,
- температура застывания - на 3-33 °С.

Максимальная депрессия вязкости и температуры застывания отмечается для нефтей с соотношением н-алканы: САК=0,13-0,25. Эффективность ультразвукового воздействия снижается при отклонении от значений этого показателя.

### **3. РЕЗУЛЬТАТЫ (RESULTS)**

Экспериментальные данные показывают, что ультразвуковое воздействие способно значительно снижать вязкость тяжелой нефти, что обусловлено дезагрегацией асфальтенов и смол, а также изменением микроструктуры нефтяной эмульсии. Гидродинамическое воздействие, в свою очередь, приводит к улучшению текучести за счет создания оптимальных условий для перемешивания и распределения компонентов нефти. Оба метода

демонстрируют потенциал для увеличения эффективности добычи и транспортировки тяжелой нефти.

Для ультразвукового воздействия:

$$\Delta\eta = -k_1 * f^2, \quad (2)$$

где  $\Delta\eta$  - изменение вязкости, %;  $f$  - частота ультразвукового воздействия, кГц;  $k_1$  - коэффициент, зависящий от свойств нефти.

Для гидродинамического воздействия:

$$\Delta\eta = -k_2 * v^2, \quad (3)$$

где  $\Delta\eta$  - изменение вязкости, %;  $v$  - скорость потока, м/с;  $k_2$  - коэффициент, зависящий от свойств нефти.

Математические модели позволяют описать зависимость изменения вязкости нефти от параметров воздействия, что может быть использовано для оптимизации процессов добычи и транспортировки тяжелой нефти.

После ультразвукового воздействия наблюдается уменьшение размера и увеличение однородности распределения асфальтеновых и смолистых частиц в нефтяной эмульсии. Это приводит к улучшению текучести и снижению вязкости нефти.

После гидродинамического воздействия наблюдается улучшение перемешивания и распределения компонентов нефти, что также приводит к улучшению текучести и снижению вязкости нефти.

В таблице 1 представлены результаты экспериментов, показывающие, как изменение частоты ультразвукового воздействия влияет на вязкость тяжелой нефти. Увеличение частоты приводит к более значительному снижению вязкости нефти.

Таблица 1 - Изменение вязкости тяжелой нефти после ультразвукового воздействия

Параметры воздействия	Изменение вязкости, %
Частота, кГц	Изменение, %
20	-15.2
40	-22.5

60	-31.8
80	-41.2
100	-49.5

В таблице 2 представлены результаты экспериментов, показывающие, как изменение скорости потока воздействует на вязкость тяжелой нефти. Увеличение скорости потока приводит к более значительному снижению вязкости нефти.

Таблица 2 - Изменение вязкости тяжелой нефти после гидродинамического воздействия

Параметры воздействия	Изменение вязкости, %
Скорость потока, м/с	Изменение, %
0.5	-10.2
1.0	-18.5
1.5	-26.8
2.0	-35.1
2.5	-43.4

### **Выводы:**

1. Ультразвуковое воздействие приводит к снижению в вязкости тяжелой нефти, причем эффект усиливается с увеличением частоты воздействия. Это может быть объяснено дезагрегацией асфальтеновых и смолистых частиц, а также изменением микроструктуры нефтяной эмульсии.

2. Гидродинамическое воздействие также приводит к снижению вязкости тяжелой нефти, причем эффект усиливается с увеличением скорости потока. Это может быть объяснено улучшением перемешивания и распределения компонентов нефти.

3. Волновые технологии могут быть эффективными для улучшения реологических свойств тяжелой нефти, что может повысить эффективность ее добычи и транспортировки. Они могут быть применены на различных стадиях нефтедобычи, от разработки месторождений до переработки нефти на нефтеперерабатывающих заводах.

4. Дальнейшие исследования необходимы для определения оптимальных параметров воздействия и оценки долгосрочного влияния на качество и свойства нефти. Это позволит разработать более эффективные и экономически целесообразные методы применения волновых технологий в нефтяной промышленности.

5. Компьютерное моделирование и математические модели могут быть использованы для прогнозирования изменений реологических свойств нефти при волновом воздействии. Это позволит оптимизировать процессы добычи и транспортировки тяжелой нефти, а также разработать новые технологии для улучшения ее свойств.

### **Обсуждение**

Результаты исследования подчеркивают важность разработки и внедрения волновых технологий в нефтяной промышленности. Однако, для широкого применения этих методов необходимо проведение дополнительных исследований для определения оптимальных параметров воздействия и оценки долгосрочного влияния на качество и свойства нефти. Также важно учитывать экономическую целесообразность и экологические аспекты внедрения данных технологий.

Возможные направления для дальнейших исследований включают:

1. Изучение влияния частоты и интенсивности ультразвукового воздействия на различные типы тяжелых нефтей.

2. Анализ долгосрочной стабильности изменений реологических свойств нефти после прекращения волнового воздействия.

3. Разработка комбинированных методов волнового воздействия для достижения синергетического эффекта в улучшении свойств нефти.

4. Оценка влияния волновых технологий на процессы очистки и переработки тяжелой нефти.

5. Исследование возможности применения волновых технологий в условиях сложных геологических формаций для увеличения извлекаемости нефти.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ (CONFLICT OF INTEREST)

Авторы подтверждают, что представленные данные не содержат конфликта интересов.

## БИБЛИОГРАФИЯ (BIBLIOGRAPHY):

1. Алфаяд А.Г.Х., Кемалов Р.А. Анализ волнового воздействия на изменение реологических характеристик тяжелой нефти // Технологии нефти и газа. 2022. № 2 (139). - С. 55-58.
2. Escobedo J., Mansoori G.A. Viscometric determination of the onset of asphaltene flocculation: a novel method // SPE Production & Facilities. 1995. - No. 10(2), - P. 115–118.
3. Jaber T. Shakib., Ali S., Hassan N. Analysis of the asphaltene properties of heavy crude oil under ultrasonic and microwave irradiation // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. 2018. - No. 129. - P. 171–180. DOI: [10.1016/j.jaap.2017.11.015](https://doi.org/10.1016/j.jaap.2017.11.015).
4. Kosta J. L. PARA-Based (Paraffin-Aromatic-Resin-Asphaltene) reservoir oil characterizations // International Symposium on Oilfield Chemistry, Society of Petroleum Engineers. 1997. No. 15. P. 421–440.
5. Mansoori G.A. Modeling of asphaltene and other heavy organic depositions // Journal of Petroleum Science and Engineering. 1997. - No. 17(1-2). - P. 101–111. DOI: 10.1016/S0920-4105(96)00059-9.
6. Mousavi S.M., Ramaza A., Najafi I., Davachi S.M. (2012). Effect of ultrasonic irradiation on rheological properties of asphaltenic crude oils, Pet. Sci. 2012. - No. 9(1). - P. 82–88.
7. Mullins O.C., Sheu E.Y., Hammami A., Marshal A.G. // Asphaltene, heavy oils and petroleomics eds. 2007. - P. 460–461. DOI: 10.1007/0-387-68903-6.
8. Shedid S.A., Attallah S.R. Influences of ultrasonic radiation on asphaltene behavior with and without solvent effects // SPE International Symposium and

EXhibition on Formation Damage Control. Society of Petroleum Engineers. 2004.  
DOI: [10.2118/86473-MS](https://doi.org/10.2118/86473-MS).

9. Spiecker P.M., Gawrys K.L., Kilpatrick P.K. Aggregation and solubility behavior of asphaltenes and their subfractions // J. Colloid Interface Sci. 2003. No. 267(1). P. 178–193.

10. Yudong S., Qiang Z., Honghong S., Xue W., Bo L. Effects of ultrasonic treatment on residue properties // China Petroleum Processing and Petrochemical Technology. 2013. No. 19(4). P.14–19.

11. Абрамов О.В., Абрамов В.О., Векслер Г.Б., Заботина Е.В., Каширская О.А., Кулов Н.Н., Школьников А.В., Муллакаев М.С. Ультразвуковая интенсификация реагентной очистки поверхностных стоков от нефтепродуктов // Химическая технология. 2008. № 9(5). С. 226–232.

12. Акрамов Т.Ф., Яркеева Н.Р. Борьба с отложениями парафиновых, асфальтосмолистых компонентов нефти // Нефтегазовое дело. 2017. № 4. - С. 67-72.

13. Алфаяд А.Г.Х., Валиев Д.З. Анализ методов волнового воздействия на призабойную зону пласта // Цифровая наука. 2021. № 3. - С. 110-121.

14. Алфаяд Ассим Г.Г., Валиев Д.З., Кемалов Р.А., Кемалов А.Ф. Анализ метода импульсно-волнового воздействия на призабойную зону пласта // Природные энергоносители и углеродные материалы. - 2021. - № 1(07). [Электронный ресурс]. URL: [energy-sources.esrae.ru/1-9](http://energy-sources.esrae.ru/1-9) (дата обращения: 27.07.2021).

15. Бажалук Я.М., Карпаш О.М., Клымышин Я.Д., Гутак А.И., Худин Н.В. Увеличение отбора нефти путем воздействия на пласты пакетами упругих колебаний // Электронный научный журнал нефтегазовое дело. 2012. № 3. - С.185-198.

16. Волкова Г. И. Применение ультразвуковой обработки для снижения вязкостно-температурных характеристик нефти // Деловой журнал neftegaz. 2015. № 3(39). - С. 20-23.

17. Зайцев Ю.В., Балакирев Ю.А. Технология и техника эксплуатации нефтяных и газовых скважин. – Москва: Недра, 1986. – 297 с.

