

УДК : 532.5.032

DOI: 10.33184/bulletin-bsu-2026.3.4

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ И СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА ФОРМИРОВАНИЕ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

© Г. И. Мухарямова*, Р. Р. Зиннатуллин, И. Г. Мухарямов,
Л. А. Ковалева

Уфимский университет науки и технологий,
Россия, Республика Башкортостан, 450076 г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32.

*Email: gulshat-karimova-1993@mail.ru

Исследовано влияние высокочастотного и сверхвысокочастотного электромагнитного воздействия на процесс формирования донных асфальто-смолистых отложений (АСПО) в модельных системах «нефть-глина» при низкой температуре. Эксперименты выполнены на семи образцах нефтей месторождений РФ с различным содержанием асфальтенов, смол и парафинов. Установлено, что эффективность обработки определяется содержанием полярных асфальтенов и наличием резонансного пика тангенса угла диэлектрических потерь в области высокочастотных частот. Высокочастотная обработка обеспечивает максимальное снижение отложений для нефтей с выраженным резонансным откликом. Сверхвысокочастотное воздействие в исследованных условиях показало меньшую эффективность, а для высокосмолистых нефтей зафиксировано увеличение отложений. Для нефтей со средним содержанием асфальтенов оба метода демонстрируют умеренную эффективность. Высокое содержание парафинов значительно снижает чувствительность к электромагнитному воздействию. Выявлена корреляция между эффективностью снижения отложений и изменением температуры застывания. Результаты позволяют рекомендовать комплексный предварительный анализ диэлектрических характеристик и компонентного состава для выбора параметров электромагнитной обработки с целью уменьшения количества асфальто-смоло-парафиновых отложений в резервуарных парках и нефтепроводах.

Ключевые слова: донные отложения, асфальто-смоло-парафиновые отложения, электромагнитная обработка, высокочастотное поле, сверхвысокочастотное поле, асфальтены, диэлектрические потери, резонанс.

Введение

Формирование донных отложений в резервуарах хранения нефти представляет технологическую проблему, особенно в условиях низких температур [1–2]. Традиционные методы борьбы с отложениями (термическая обработка, химическое ингибирование) имеют ограничения по энергоэффективности и экологической безопасности [3]. В последние годы исследуются физические методы воздействия, в частности электромагнитная обработка [4–5], однако механизмы ее действия в безводных системах при низких температурах изучены недостаточно.

Цель работы – экспериментальное исследование влияния ВЧ- и СВЧ-полей на формирование донных отложений в модельных системах «нефть-глина» при низкой температуре для нефтей с различным компонентным составом.

Объекты и методы исследования

Исследования проведены на семи образцах нефтей российских месторождений: Арчинская (Томская область), Ярегская и Усинская (Республика Коми), Уренгойская (Ямало-Ненецкий автономный округ), Арланская, Девонская (Республика Башкортостан), Тайлаковская (Ханты-Мансийский автономный округ). Пробы до проведения экспериментов хранились в герметичных контейнерах при 4 °С.

Для моделирования твердой фазы использовалась природная глина, подготовленная по стандартной методике (высушивание при 105 °С, прокатка, просеивание через сито с ячейкой 1 мм). Выбор глины обусловлен тем, что глинистые частицы являются основным компонентом механических примесей в нефти, а глиняная пробка традиционно используется для герметизации нефтепроводов при ремонтных работах, что делает глину релевантной моделью твердой фазы донных отложений [4].

Смесь «нефть-глина» формировалась в соотношении 60 мл нефти к 40 мг глины. Перед смешиванием нефть подвергалась электромагнитной обработке:

- ВЧ-обработка (13,56 МГц, до температуры 45 °С) (рис. 1) [5];
- СВЧ-обработка (2,45 ГГц, до температуры 45 °С).

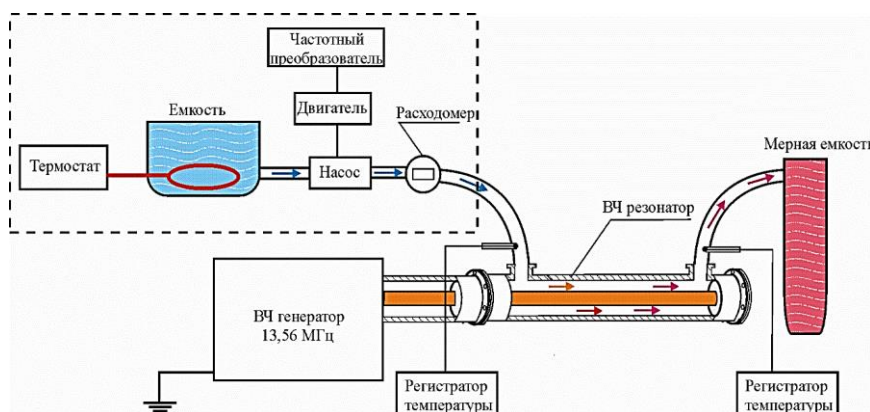


Рис. 1. Принципиальная схема высокочастотной электромагнитной установки (13,56 МГц).

Температура нефти контролировалась взрывобезопасным электронным термометром ExT-01/1. После обработки нефть охлаждалась до комнатной температуры ($\sim 20^\circ\text{C}$) и смешивалась с глиной лабораторной мешалкой (1 200 об/мин, 5 мин) до получения однородной суспензии. Образцы помещались в стеклянные цилиндрические емкости объемом 100 мл и охлаждались до -5°C для моделирования зимних эксплуатационных условий.

Оценка величины донных отложений осуществлялась по методу, аналогичному ГОСТ 2517 [6] (рис. 2). Измерения проводились с интервалом 10–15 мин в течение 100 мин. Дополнительно проводилось визуальное оценивание консистенции отложений. Эксперименты выполнялись не менее трех раз; статистическая обработка включала вычисление среднего значения и стандартного отклонения.

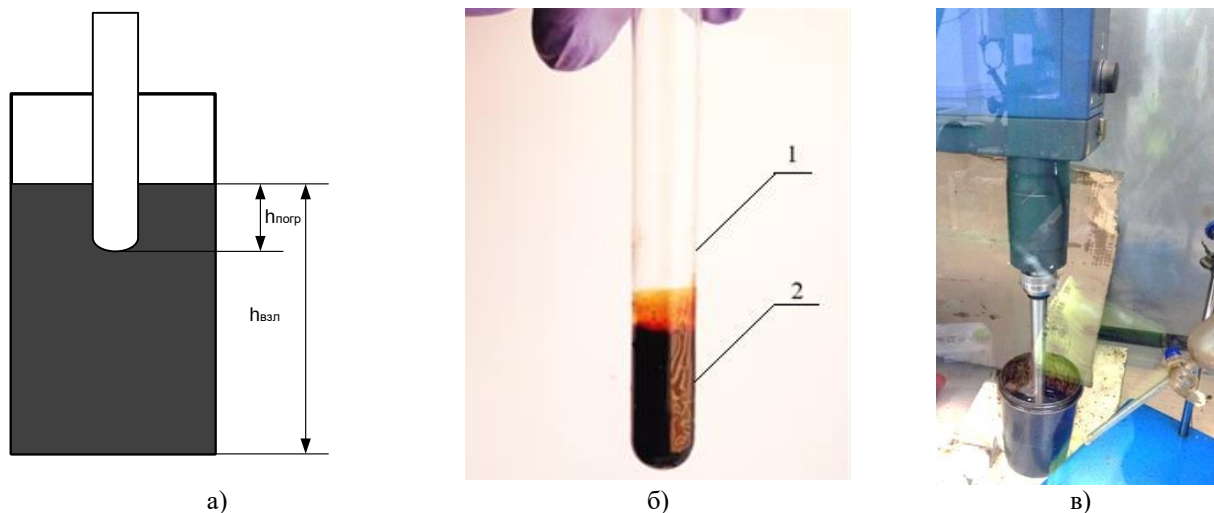


Рис. 2. Схема измерения донных отложений в емкостях в процессе экспериментов:

- 1 – измерительный инструмент, 2 – исследуемый образец,
 $h_{\text{погр}}$ – глубина на которую свободно погружается измерительная колба,
 $h_{\text{взл}}$ – суммарный, общий уровень исследуемого образца (смеси нефти с глиной); а) схема эксперимента, б) измерительный элемент
 в) смешение нефти и глины электрической мешалкой.

За температуру застывания принимают ту условную температуру, при которой налитая в пробирку стандартных размеров испытуемая нефть при охлаждении застывает настолько, что при наклоне пробирки с испытуемой нефтью под углом 45° уровень нефти остается неподвижным в течение 1 мин. Одним из наиболее важных параметров при формировании донных отложений в резервуарах является температура застывания, определяющая возможность перекачки нефти при низких температурах. В рамках эксперимента предварительно охлажденная в холодильной установке нефть помещалась в водяную баню с термопарой. По мере нагревания и выдержки образцов температура застывания определялась согласно методике, приведенной в РД-39-3-812-82 [7] (рис. 3).

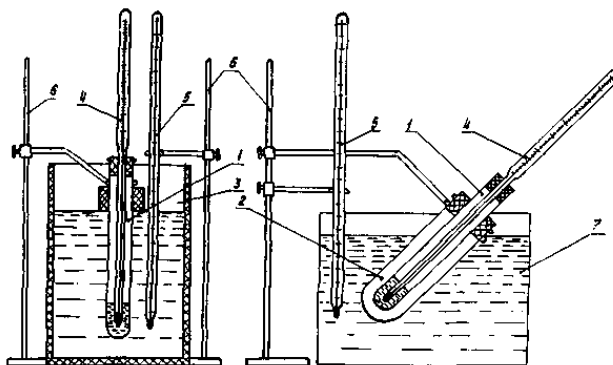


Рис. 3. Схема определения температуры застывания а) в соответствии с методикой определения температуры застывания парафиновых нефтей.

Зависимость резонансной частоты от тангенса угла диэлектрических потерь

Для анализа механизмов взаимодействия электромагнитного поля с нефтью и обоснования выбора частоты обработки были использованы опубликованные экспериментальные данные по диэлектрическим характеристикам нефтей Приобского, Вынгапуровского, Тайлаковского и Западно-Усть-Балыкского месторождений.

Диэлектрические параметры (относительная диэлектрическая проницаемость ϵ' и тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$) в указанных работах определяли на измерителях добротности ВМ-560 (диапазон частот 0,1–30 МГц) и Е4-11 (диапазон частот 1–100 МГц) [8]. Измерения проводились методом замещения в коаксиальной ячейке при температуре 20 °С.

На рис. 4 представлены экспериментальные зависимости тангенса угла диэлектрических потерь от частоты электромагнитного поля для эталонных нефтей, полученные Р. Р. Зиннатуллиным и Л. А. Ковалевой [8–9].

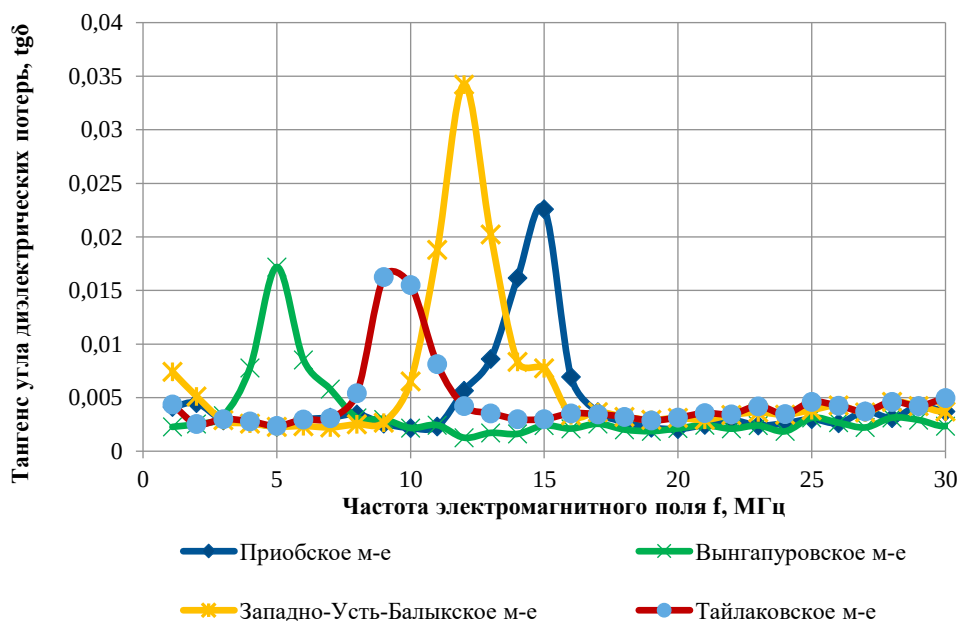


Рис. 4. Экспериментальные зависимости тангенса угла диэлектрических потерь от частоты электромагнитного поля.

Анализ зависимостей $\text{tg}\delta(f)$ показывает, что для каждой нефти характерна индивидуальная резонансная частота, соответствующая максимуму $\text{tg}\delta$. Физический механизм этого явления связан с релаксационной поляризацией асфальтеновых агрегатов [5]. Асфальтены в нефти образуют надмолекулярные структуры (кластеры) размером 2–10 нм, которые при воздействии переменного электромагнитного поля испытывают ориентационную поляризацию. При совпадении частоты внешнего поля с собственной частотой релаксации этих структур происходит резонансное поглощение энергии, что характеризуется максимумом $\text{tg}\delta$ [5; 8].

Согласно данным [8–9], для исследованных эталонных нефтей установлены следующие резонансные частоты: Вынгапуровская нефть (асфальтены 0,62%, смолы 5,10%) – резонансный пик при $f_{рез} \approx 5$ МГц с $tg\delta_{max} \approx 0,017$ –0,018; Тайлаковская нефть (асфальтены 3,20%, смолы 11,40%) – резонансный пик при $f_{рез} \approx 9$ –10 МГц с $tg\delta_{max} \approx 0,016$ –0,017; Западно-Усть-Балыкская нефть (асфальтены 0,8–1,2%, смолы 6,0–6,3%) – наиболее выраженный резонансный пик при $f_{рез} \approx 12$ –13 МГц с $tg\delta_{max} \approx 0,034$ –0,035; Приобская нефть (асфальтены 0,60%, смолы 5,30%) – резонансный пик при $f_{рез} \approx 15$ МГц с $tg\delta_{max} \approx 0,022$ –0,023.

Таким образом, область резонансных частот для нефтей Западной Сибири находится в диапазоне 5–15 МГц, что подтверждает целесообразность применения частоты 13,56 МГц для ВЧ-обработки, так как эта частота попадает в зону резонанса для большинства нефтей Сургутского свода и Приобья [5; 10].

Классификация исследованных образцов по аналогии с эталонными нефтями

Поскольку для исследованных образцов не проводились прямые измерения диэлектрических характеристик, был выполнен сравнительный анализ их компонентного состава с приведенными выше эталонными нефтями (табл. 1).

Таблица 1

Сравнительный анализ компонентного состава исследованных нефтей с эталонными

Образец	Асфальтены, %	Смолы, %	Парафины, %	Сера, %	Предполагаемая $f_{рез}$, МГц	Аналог
Арчинская	1,60	5,09	6,75	0,44	12–13	Западно-Усть-Балыкская
Арланская	2,04	11,73	5,20	2,61	12–13	Западно-Усть-Балыкская
Девонская	3,01	10,84	5,80	2,71	12–13	Западно-Усть-Балыкская
Уренгойская	0,92	10,60	3,80	0,06	~5	Вынгапуровская
Тайлаковская	3,20	11,40	3,75	0,10	9–10	Тайлаковская (эталон)
Ярегская	17,33	26,41	0,90	1,23	12–15	Нет аналога
Усинская	1,80	19,50	38,00	0,34	—	Нет аналога

Арчинская, Арланская и Девонская нефти близки по составу к Западно-Усть-Балыкской, для которой согласно данным [8–9] $f_{рез} \approx 12$ –13 МГц. Следовательно, для этих образцов можно ожидать максимальную эффективность ВЧ-обработки на частоте 13,56 МГц.

Уренгойская нефть по компонентному составу близка к Вынгапуровской, для которой $f_{рез} \approx 5$ МГц [8–9]. Частота 13,56 МГц значительно отличается от резонансной, поэтому можно ожидать умеренную эффективность обработки.

Ярегская нефть имеет уникально высокое содержание асфальтенов (17,33%) и смол (26,41%) – это тяжелая битуминозная нефть, не имеющая прямых аналогов среди эталонных образцов. Высокая концентрация полярных компонентов предполагает наличие резонансного пика в диапазоне 12–15 МГц.

Усинская нефть характеризуется экстремально высоким содержанием парафинов (38,00%), что делает ее уникальным образцом, для которого механизм взаимодействия с ЭМ полем может отличаться от других нефтей.

Результаты и обсуждение

Основные свойства исследованных нефтей и результаты экспериментов представлены в табл. 2.

Анализ данных, представленных в табл. 2, позволяет выявить закономерности влияния высокочастотного (ВЧ) и сверхвысокочастотного (СВЧ) электромагнитных полей на структурно-реологические свойства нефтей различного состава. Ключевые наблюдения группируются по трем аспектам: эффективность снижения величины отложений, изменение температуры застывания и роль компонентного состава.

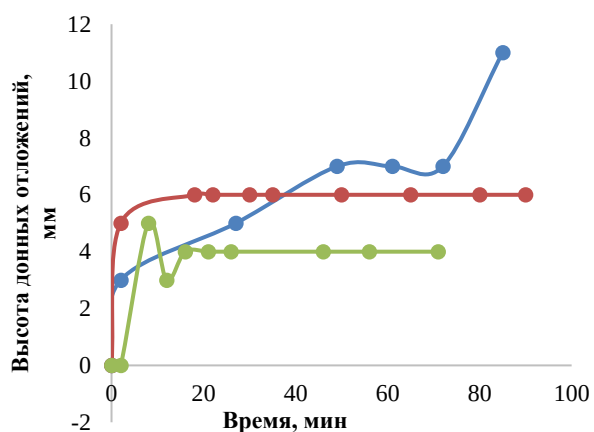
Таблица 2

Свойства исследованных нефтей и результаты экспериментов

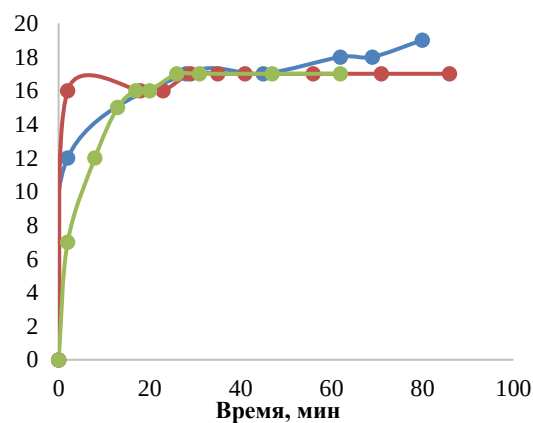
Образец нефти	Асфальтены, % масс.	Смолы, % масс	Парафины, % масс	Сера, % масс	Тзаст, °С (исходная)	Тзаст после ВЧ, °С	Тзаст после СВЧ, °С	Высота отложений, мм (без поля / ВЧ ЭМ/ СВЧ ЭМ)
Арчинская	1,60	5,09	6,75	0,44	+15,0	+7,0	+9,0	11 / 4 / 6
Ярегская	17,33	26,41	0,90	1,23	+1,6	-3,0	+3,0	16 / 9 / 17
Арланская	2,04	11,73	5,20	2,61	+2,5	-4,0	+6,0	16 / 7 / 22
Уренгойская	0,92	10,60	3,80	0,06	+1,4	0,0	+0,5	16 / 14 / 15
Усинская	1,80	19,50	38,00	0,34	+14,5	+13,0	+13,0	19 / 17 / 17
Девонская	3,01	10,84	5,80	2,71	-8,0	-9,5	-8,8	16 / 14 / 15
Тайлаковская	3,20	11,40	3,75	0,10	-22,0	-23,5	-22,8	16 / 14 / 15

1. Влияние обработки на высоту асфальтено-парафиновых отложений

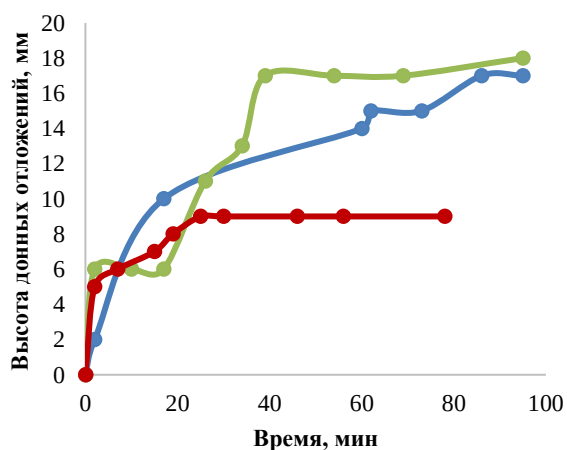
На рис. 5 представлены графические зависимости формирования отложений для семи образцов нефтей.



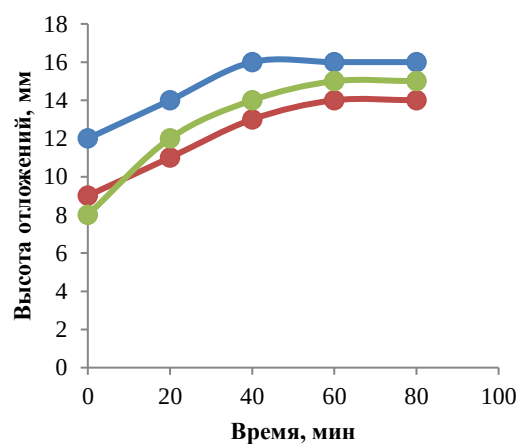
а) Арчинская нефть



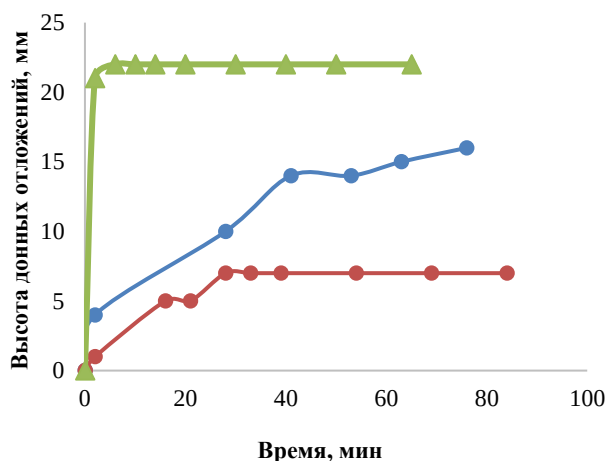
б) Усинская нефть



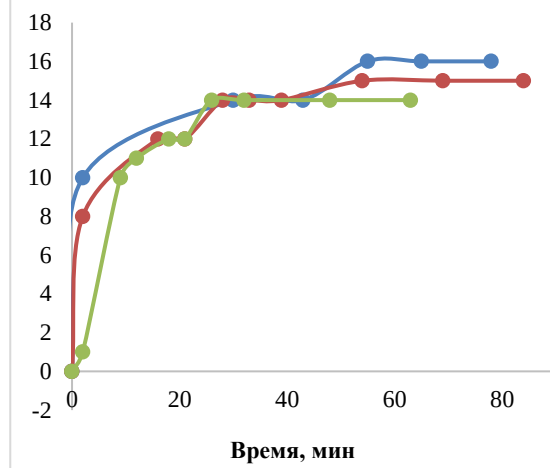
в) Ярегская нефть



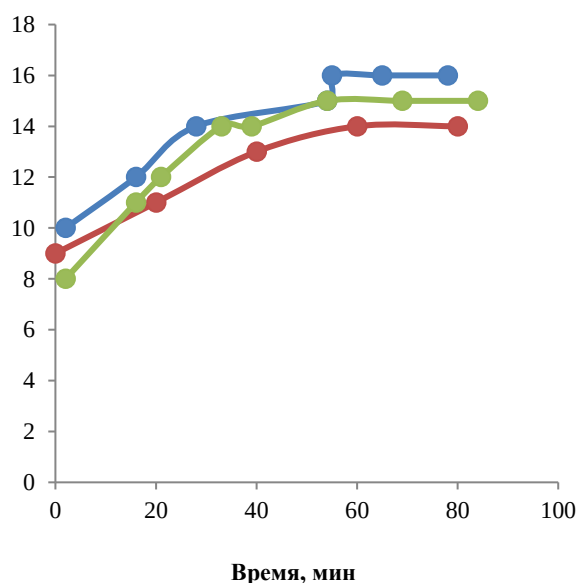
г) Тайлаковская нефть



д) Арланская нефть



е) Уренгойская нефть



ж) Девонская нефть



з) Девонская нефть через несколько суток после ВЧ ЭМ обработки

— $h_{\text{донн}}$, мм — $h_{\text{донн}}$ (СВЧ), мм — $h_{\text{донн}}$ (ВЧ)

Рис. 5. Зависимость высоты отложений от времени: синяя кривая – необработанная нефть, зеленая – после СВЧ воздействия, красная – после ВЧ ЭМ воздействия.

На представленных графиках отражена динамика высоты донных отложений для 7 образцов нефтей без воздействия, после обработки высокочастотным электромагнитным (ВЧ ЭМ) полем, после сверхвысокочастотного (СВЧ ЭМ) воздействия.

Для выявления закономерностей влияния ЭМ-обработки нефти были сгруппированы по величине резонансных частот.

Нефти с предполагаемой резонансной частотой 12–13 МГц (Арчинская, Арланская, Девонская). Арчинская нефть продемонстрировала максимальную эффективность ВЧ-обработки: снижение высоты отложений на 64% (с 11 до 4 мм). Арланская нефть также показала положительный отклик – снижение на 56% (с 16 до 7 мм). Высокая эффективность объясняется близостью частоты воздействия (13,56 МГц) к предполагаемой резонансной частоте данных нефтей (~12–13 МГц), что обеспечивает максимальную диссипацию энергии ЭМ поля и разрушение асфальтеновых агрегатов [5; 8; 11].

Девонская нефть показала умеренный результат – снижение отложений на 13% (с 16 до 14 мм). Более высокое содержание смол (10,84%) может приводить к экранированию полярных центров асфальтенов смолистыми веществами, что снижает эффективность резонансного взаимодействия [12].

Нефти с предполагаемой резонансной частотой ~5 МГц (Уренгойская). Уренгойская нефть показала умеренный результат – снижение на 13% (с 16 до 14 мм). Это объясняется тем, что частота воздействия 13,56 МГц значительно отличается от предполагаемой резонансной частоты данной нефти (~5 МГц), что снижает эффективность резонансного взаимодействия.

Нефти с уникальным составом. Ярегская нефть (17,33% асфальтенов, 26,41% смол) продемонстрировала снижение высоты отложений на 44% (с 16 до 9 мм) при ВЧ-обработке. Высокая концентрация полярных асфальтенов обеспечила интенсивное взаимодействие с ВЧ-полем и деструкцию надмолекулярных структур [5; 13].

Усинская нефть показала наименьший отклик на ВЧ-обработку – снижение высоты отложений всего на 10% (с 19 до 17 мм), несмотря на наличие асфальтенов (1,80%). Это объясняется экстремально высоким содержанием парафинов (38,00%), которые доминируют в формировании структуры отложений. Парафины, являясь неполярными соединениями, слабо реагируют на электромагнитное воздействие в исследованном частотном диапазоне [4], что существенно снижает общую эффективность ВЧ-обработки для данной нефти.

Эффективность СВЧ-обработки. СВЧ-воздействие в исследованных условиях оказалось менее эффективным по сравнению с ВЧ-обработкой. Из 7 образцов только для двух (Арчинская и Уренгойская нефти) зафиксировано незначительное снижение отложений. Для остальных образцов наблюдалось либо отсутствие эффекта, либо увеличение высоты отложений: Ярегская – на 6% (с 16 до 17 мм), Арланская – на 38% (с 16 до 22 мм).

Различия в эффективности объясняются механизмами взаимодействия электромагнитного поля с полярными компонентами нефти. ВЧ-поле (13,56 МГц) преимущественно воздействует на ориентационную поляризацию крупных асфальтеновых агрегатов [5; 10; 14]. СВЧ-поле (2,45 ГГц) взаимодействует в основном с молекулами воды и низкомолекулярными полярными соединениями, что при низком содержании водной фазы не обеспечивает существенного влияния на структуру отложений [5; 13].

Долгосрочная стабильность эффекта ВЧ-обработки. Для Девонской нефти проведен контрольный эксперимент в течение 15 суток. Необработанный образец демонстрирует стабильную высоту отложений на уровне 24–26 мм. После ВЧ-обработки высота снижается до 17–19 мм и сохраняется стабильной, что подтверждает длительную эффективность метода [5; 15].

2. Корреляция изменений отложений и температуры застывания

Одним из наиболее важных параметров при формировании донных отложений в резервуарах является температура застывания, знание которой критически важно для обеспечения безаварийной эксплуатации нефтепроводов и резервуарных парков, т.к. позволяет определить минимально допустимые температуры перекачки и хранения нефти, предотвратить ее застывание в трубопроводах и емкостях, а также оптимизировать энергозатраты на подогрев и транспортировку. На рис. 6 представлена диаграмма изменения температуры застывания ($T_{заст}$) для семи образцов нефтей после ВЧ и СВЧ ЭМ методов воздействия.

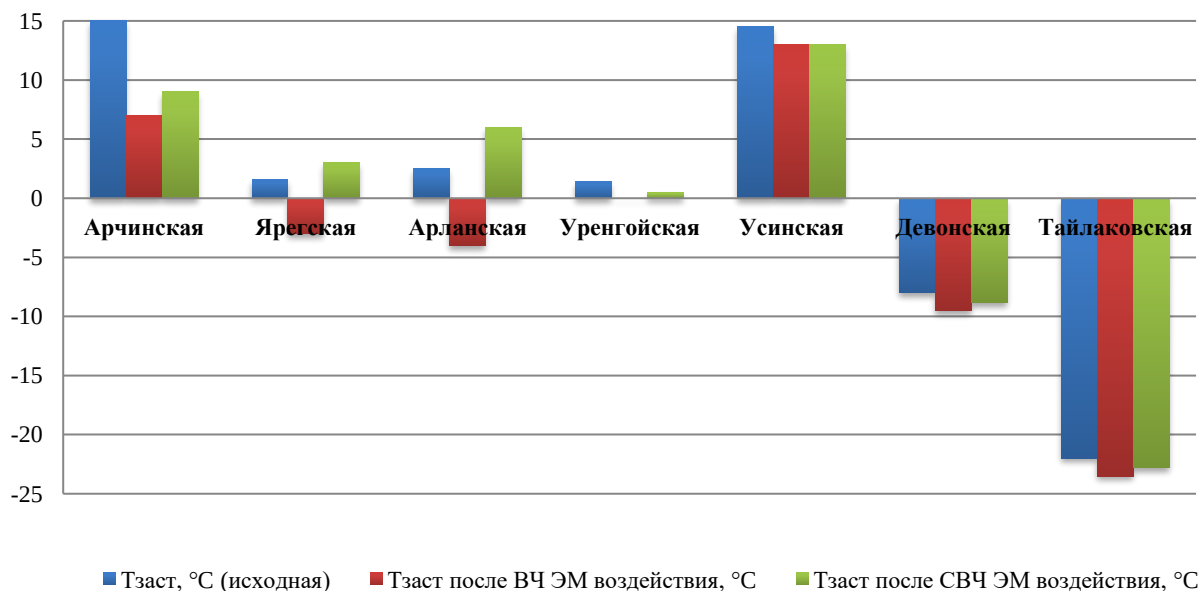


Рис. 6. Диаграмма изменения температуры застывания нефти от метода обработки: синяя кривая – необработанная нефть, зеленая – после СВЧ ЭМ воздействия, красная – после ВЧ ЭМ воздействия.

Анализ показывает корреляцию между эффективностью снижения донных отложений и изменением температуры застывания, определяемую содержанием полярных асфальтенов и наличием резонансных эффектов.

Для Арчинской нефти (1,60% асфальтенов) с резонансным пиком в ВЧ-диапазоне зафиксировано максимальное снижение как отложений (–64%), так и $T_{заст}$ (с +15,0 до +7,0 °С, $\Delta T = -8,0$ °С). Арланская нефть (2,04% асфальтенов) также показала высокую эффективность: снижение отложений на 56% сопровождалось уменьшением $T_{заст}$ до –4,0 °С ($\Delta T = -6,5$ °С).

Для нефтей со средним содержанием асфальтенов (Девонская, Тайлаковская) характерно умеренное снижение отложений (на 13%) при минимальном изменении $T_{заст}$ ($\Delta T = -1,5$ °С).

Ярегская нефть с высоким содержанием асфальтенов (17,33%) продемонстрировала снижение отложений на 44% и $T_{заст}$ на 4,6 °С при ВЧ-обработке.

Усинская нефть с высоким содержанием парафинов (38,00%) показала слабую реакцию на оба типа обработки: снижение отложений на 10% при $\Delta T = -1,5$ °С.

3. Влияние компонентного состава на эффективность обработки

Анализ данных *табл. 1* и *2* показывает, что реакция нефтей на электромагнитное воздействие определяется содержанием полярных асфальтенов и их диэлектрическими характеристиками [5; 8; 10; 16]. Наличие резонансного пика тангенса угла диэлектрических потерь в области ВЧ-частот обеспечивает резонансное взаимодействие и деструкцию надмолекулярных структур.

Влияние содержания парафинов. Усинская нефть с высоким содержанием парафинов (38,00%) продемонстрировала слабую реакцию на оба типа обработки, что обусловлено термодинамическим характером кристаллизации парафинов [17].

Влияние содержания серы. Анализ данных по Уренгойской (0,06% серы), Девонской (2,71%) и Тайлаковской (0,10%) нефтям показал, что содержание серы не оказывает существенного влияния на эффективность электромагнитной обработки. Ключевым фактором остается баланс асфальтенов и смол [18].

Заключение

Экспериментально установлено, что эффективность ВЧ электромагнитной обработки нефтей определяется взаимосвязанными параметрами: содержанием полярных асфальтенов и наличием резонансного пика тангенса угла диэлектрических потерь в области ВЧ-частот. Максимальная интенсивность взаимодействия наблюдается при совпадении частоты внешнего поля с собственной частотой релаксации асфальтеновых структур.

Выявлена устойчивая корреляция между эффективностью снижения донных отложений и изменением температуры застывания нефти после ВЧ-обработки. Для образцов с выраженным резонансным откликом (Арчинская, Арланская) зафиксировано максимальное снижение температуры застывания (до 8,0 °С), что существенно расширяет температурный диапазон безаварийной эксплуатации нефтепроводов и резервуарных парков в зимний период. Умеренное изменение температуры застывания для нефтей со средним содержанием асфальтенов ($\Delta T \approx 1,5$ °С) указывает на необходимость индивидуального подбора параметров обработки для достижения значимого реологического эффекта.

СВЧ-обработка на частоте 2,45 ГГц в исследованных условиях продемонстрировала ограниченную эффективность и не рекомендуется для нефтей с высоким содержанием смол (> 25%), так как может способствовать агрегации смолисто-асфальтеновых комплексов и увеличению отложений.

Классификация нефтей по содержанию асфальтенов и предполагаемым резонансным частотам позволяет прогнозировать эффективность обработки:

- нефти с низким содержанием асфальтенов (< 2%) при наличии резонансного пика в диапазоне 12–15 МГц – высокая эффективность ВЧ-обработки;
- нефти со средним содержанием асфальтенов (2–4%) – умеренная эффективность;
- нефти с высоким содержанием асфальтенов (> 4%) – высокая эффективность ВЧ-обработки;
- высокопарафинистые нефти (> 35% парафинов) – низкая эффективность электромагнитных методов.

ВЧ-обработка обеспечивает устойчивое снижение отложений в течение длительного периода (до 15 суток), что подтверждает перспективность применения метода для магистральных нефтепроводов и резервуарных парков в условиях низких температур.

Для практического применения метода рекомендуется предварительный анализ компонентного состава нефти и измерение частотных зависимостей диэлектрических потерь для выявления резонансных частот и индивидуального подбора параметров ЭМ воздействия.

Полученные результаты согласуются с данными других исследований [3; 5; 8–10; 16] и создают основу для разработки эффективных технологий хранения и трубопроводного транспорта нефтей, в частности: систем предварительной высокочастотной обработки нефтей перед закачкой в резервуары для предотвращения формирования донных отложений; установок электромагнитной подготовки нефтей перед транспортировкой по магистральным нефтепроводам для снижения температуры застывания и улучшения реологических характеристик;

методов селективного выбора частоты обработки на основе предварительного анализа диэлектрических характеристик конкретных нефтей; комбинированных технологий, включающих ВЧ-обработку совместно с химическими ингибиторами для высокопарафинистых нефтей.

Авторы выражают благодарность ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» за предоставление лабораторной базы и техническую поддержку исследования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Комаров О. Е., Дементьев А. И., Подоплелов Е. В. Решение проблемы донных отложений в резервуарных парках для хранения нефти и нефтепродуктов // Сб. научных трудов Ангарского гос. технич. ун-та. 2019. Т. 1. №16. С. 33–36. [Komarov O. E., Dementiev A. I., Podoplelov E. V. Solution of the problem of bottom sediments in tank farms for storage of oil and petroleum products // Collection of scientific papers of Angarsk State Technical University. 2019. Vol. 1. No. 16. P. 33–36].
2. Привезенцев А. Ю., Дементьев А. И., Подоплелов Е. В. Разработка технического проекта реконструкции резервуара для хранения нефти // Сб. научных трудов Ангарского гос. технич. ун-та. 2019. Т. 1, №16. С. 101–105. [Privezentsev A. Yu., Dementiev A. I., Podoplelov E. V. Development of a technical project for reconstruction of an oil storage tank // Collection of scientific papers of Angarsk State Technical University. 2019. Vol. 1. No. 16. P. 101–105].
3. Ковалева Л. А., Зиннатуллин Р. Р., Мусин А. А., Фатхуллина Ю. И. Применение ВЧ и СВЧ электромагнитных полей при подготовке нефти и переработке нефтяных шламов // Георесурсы, геознергетика, геополитика. 2012. №1(5). С. 45–50. [Kovaleva L. A., Zinnatullin R. R., Musin A. A., Fatkhullina Yu. I. Application of RF and microwave electromagnetic fields in oil preparation and processing of oil sludge // Georesources, Geoenergy, Geopolitics. 2012. No. 1(5). P. 45–50].
4. Зайдуллин И., Петрова Л., Аббакумова Н., Фосс Т. Состав тяжелых нефтей и структурные характеристики компонентов как факторы, влияющие на устойчивость нефтей к осаждению асфальтенов // Вестник Казанского технологич. ун-та. 2013. №17. С. 182–187. [Zaidullin I., Petrova L., Abbakumova N., Foss T. Composition of heavy oils and structural characteristics of components as factors affecting the stability of oils to asphaltene precipitation // Bulletin of Kazan Technological University. 2013. No. 17. P. 182–187].
5. Мухарьямова Г. И. Исследование влияния электромагнитной обработки на реологические свойства высоковязких и парафинистых нефтей и моделирование их течения в трубопроводе: дис. ... канд. техн. наук. Уфа, 2023. 148 с. [Mukharyamova G. I. Study of the effect of electromagnetic treatment on the rheological properties of highly viscous and paraffinic oils and modeling of their flow in a pipeline: Cand. Tech. Sci. thesis. Ufa, 2023. 148 p.].
6. ГОСТ 2517–2022. Нефть. Методы отбора, подготовки и хранения проб для лабораторных анализов и испытаний. М.: Стандартиформ, 2022. 28 с. [GOST 2517–2022. Petroleum. Methods of sampling, preparation and storage of samples for laboratory analyses and tests. Moscow: Standartinform, 2022. 28 p.].
7. РД-39-3-812-82 Методика определения температуры застывания парафиновых нефтей. Реологические свойства. М.: Миннефтепром СССР, 1982. [RD-39-3-812-82 Method for determining the pour point of paraffinic oils. Rheological properties. Moscow: Minnefteprom SSSR, 1982].
8. Ковалева Л. А., Зиннатуллин Р. Р. К определению температурно-частотных и диэлектрических характеристик нефтей // Теплофизика высоких температур. 2006. Т. 44. №6. С. 954–956. [Kovaleva L. A., Zinnatullin R. R. On the determination of temperature-frequency and dielectric characteristics of oils // High Temperature. 2006. Vol. 44, No. 6. P. 954–956].
9. Зиннатуллин Р. Р., Ковалева Л. А. Исследования диэлектрических свойств нефтяных дисперсных систем в зависимости от соотношения асфальтосмолистых веществ // Письма в ЖТФ. 2022. Т. 48. №4. С. 41–47. [Zinnatullin R. R., Kovaleva L. A. Studies of dielectric properties of oil dispersion systems depending on the ratio of asphalt-resinous substances // Technical Physics Letters. 2022. Vol. 48, No. 4. P. 41–47].
10. Кислицын О. В., Ларионов В. Г., Бухарин О. И. Электрофизические и коллоидные аспекты применения электромагнитных полей в технологиях подготовки тяжелых нефтей // Нефтяное хозяйство. 2015. №4. С. 78–82. [Kislitsyn O. V., Larionov V. G., Bukharin O. I. Electrophysical and colloidal aspects of electromagnetic fields application in heavy oil preparation technologies // Oil Industry. 2015. No.4. P. 78–82].
11. Балакирев В. А., Сотников Г. В., Ткач Ю. В., Яценко Т. Ю. Разрушение асфальтопарафинистых отложений в нефтяных трубопроводах движущимся источником высокочастотного электромагнитного излучения // Журнал технической физики. 2001. Т. 41. №9. С. 1–8. [Balakirev V. A., Sotnikov G. V., Tkach Yu. V., Yatsenko T. Yu. Destruction of asphalt-paraffin deposits in oil pipelines by a moving source of high-frequency electromagnetic radiation // Technical Physics. 2001. Vol. 41. No. 9. P. 1–8].
12. Лоскутова Ю. Ю., Юдина Н. В. Влияние магнитного поля на структурно-реологические свойства нефтей // Известия ТПУ. 2006. №4. С. 112–116. [Loskutova Yu. V., Yudina N. V. Influence of magnetic field on structural and rheological properties of oils. Bulletin of Tomsk Polytechnic University. 2006. No. 4. P. 112–116].
13. Gunal O. G., Islam M. R. Alteration of asphaltic crude rheology with electromagnetic and ultrasonic irradiation // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2000. Vol. 26. P. 263–272.
14. Sheu E. Y., De Tar M. M., Storm D. A. Dielectric properties of asphaltene solutions // Fuel. 1994. Vol. 73, No. 1. P. 45–50.
15. Kovaleva L., Zinnatullin R., Musin A., et al. Influence of radio-frequency and microwave electromagnetic treatment on water-in-oil emulsion separation // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2021. Vol. 614. P. 126081.
16. Mullins O. C. The modified Yen model // Energy & Fuels. 2010. Vol. 24, No. 4. P. 2179–2207.
17. ГОСТ 11851-2018 Нефть. Методы определения парафинов (с поправкой). М.: Стандартиформ, 2019. [GOST 11851-2018 Petroleum. Methods for determination of paraffins (with amendment). Moscow: Standartinform, 2019].
18. Spiecker P. M., Garrys K. L., Trail C. J., Kilpatrick P. K. Effects of petroleum resins on asphaltene aggregation and water-in-oil emulsion formation // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2003. Vol. 220. No. 1–3. P. 9–27.

Поступила в редакцию 09.03.2026 г.

DOI: 10.33184/bulletin-bsu-2026.3.4

**EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE HIGH-FREQUENCY
AND MICROWAVE ELECTROMAGNETIC FIELDS IMPACT
ON THE BOTTOM SEDIMENT FORMATION**

© G. I. Mukharyamova*, R. R. Zinnatullin, I. G. Mukharyamov, L. A. Kovaleva

*Ufa University of Science and Technology,
32 Zaki Validi st., 450076 Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia.***Email: gulshat-karimova-1993@mail.ru*

The influence of high-frequency (HF) and ultra-high-frequency (UHF) electromagnetic fields on the formation of bottom asphalt-resin deposits (ARD) in model “oil–clay” systems at low temperature was investigated. Experiments were carried out on seven oil samples from Russian fields with varying contents of asphaltenes, resins, and paraffins. It was established that the treatment efficiency is determined by the content of polar asphaltenes and the presence of a resonance peak in the tangent of dielectric loss angle in the HF range. HF treatment provides maximum reduction of deposits for oils with pronounced resonant response. UHF exposure under the studied conditions showed lower efficiency, and an increase in deposits was recorded for high-resin oils. For oils with average asphaltene content, both methods demonstrate moderate efficiency. High paraffin content significantly reduces sensitivity to electromagnetic exposure. A correlation was revealed between the efficiency of deposit reduction and the change in pour point. The results allow recommending a comprehensive preliminary analysis of dielectric characteristics and component composition for selecting electromagnetic treatment parameters to reduce asphalt-resin-paraffin deposits in tank farms and oil pipelines.

Keywords: bottom sediments, asphalt-resin-paraffin deposits, electromagnetic treatment, high-frequency field, ultra-high-frequency field, asphaltenes, dielectric loss, resonance.

*Received 09.03.2026.***Об авторах / About the authors****Мухарьямова Гульшат Ильдаровна**

Уфимский университет науки и технологий,
канд. техн. наук,
Email: gulshat-karimova-1993@mail.ru

Mukharyamova Gulshat Ildarovna

Ufa University of Science and Technology,
Cand. Tech. Sci.,
Email: gulshat-karimova-1993@mail.ru

Зиннатуллин Расул Рашитович

Уфимский университет науки и технологий,
канд. техн. наук,
доцент кафедры прикладной физики,
Физико-технический институт,
Email: rasulz@yandex.ru

Zinnatullin Rasul Rashitovich

Ufa University of Science and Technology,
Cand. Tech. Sci., Associate Professor
of the Department of Applied Physics,
Institute of Physics and Technology,
Email: rasulz@yandex.ru

Мухарьямов Ильнур Гиндуллович,

Уфимский университет науки и технологий,
аспирант кафедры прикладной физики,
Физико-технический институт,
Email: dream8708@inbox.ru

Mukharyamov Ilnur Gindullovich,

Ufa University of Science and Technology,
Postgraduate Student
of the Department of Applied Physics,
Institute of Physics and Technology,
Email: dream8708@inbox.ru

Ковалева Лиана Ароновна,

Уфимский университет науки и технологий,
д-р техн. наук, профессор,
зав. кафедрой прикладной физики,
Физико-технический институт,
Email: liana-kovaleva@yandex.ru

Kovaleva Liana Aronovna,

Ufa University of Science and Technology,
Dr. Tech. Sci., Professor,
Head of the Department of Applied Physics,
Institute of Physics and Technology,
Email: liana-kovaleva@yandex.ru