

**ИССЛЕДОВАНИЕ ИНДИВИДУАЛЬНОГО И СИНХРОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ
ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ
НА ТЕМПЕРАТУРУ ЗАМЕРЗАНИЯ ВЫСОКОПАРАФИНИСТЫХ НЕФТЕЙ**

Л. А. АББАСОВА

*Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности,
Баку, Азербайджан*

Аннотация. *В статье рассмотрено влияние физических и химических методов обработки на температуру замерзания высокопарафинистых нефтей. Цель исследования заключалась в изучении индивидуального и синхронного воздействия ультразвуковых волн и депрессорной присадки «Дифрон-4202» на реологические свойства высоковязкой парафинистой нефти. Эксперименты проводились в лабораторных условиях при изменении частот и амплитуд ультразвука, времени обработки, а также концентрации химического реагента. Установлено, что ультразвуковое воздействие продолжительностью 25 минут снижает температуру замерзания нефти с +15 °С до –3 °С. Оптимальная концентрация присадки при индивидуальном использовании составила 700 ppm, что обеспечивает снижение температуры замерзания до +3,4 °С. Наибольший эффект достигнут при синхронном применении ультразвука и химического реагента: воздействие 20 минут в сочетании с 350 ppm присадки позволило снизить температуру замерзания образца до –16 °С. Полученные результаты подтверждают высокую эффективность комбинированного физико-химического подхода к снижению температуры замерзания высокопарафинистых нефтей и демонстрируют перспективность его применения для технологических процессов добычи, транспортировки и хранения тяжелых нефтей.*

Ключевые слова: *высокопарафинистые нефти, температура замерзания, ультразвуковое воздействие, депрессорные присадки, Дифрон-4202, комбинированные методы обработки, реологические свойства нефти, синергетический эффект, физико-химическое воздействие.*

В настоящее время состав и физико-химические свойства нефтей, добываемых в сфере нефтедобычи по всему миру, становятся все более сложными и изменяются. Основной причиной этого является то, что около 90% нефтей, добываемых на действующих месторождениях, представляют собой парафинистые нефти с высокой вязкостью и высокой температурой застывания. При добыче, хранении и транспортировке этих видов нефтей по трубопроводам возникает ряд важных и сложных технологических проблем. Так, эти виды нефтей со сложным физико-химическим составом отличаются аномально высокой вязкостью и образуют асфальтено-смолисто-парафиновые отложения в процессах добычи, хранения и транспортировки. Следует отметить, что в течение многих лет для транспортировки и добычи высоковязких нефтей применялись в основном термические методы. Однако в последние десятилетия проводятся интенсивные научные исследования по применению методов физического воздействия, включающих магнитные, электромагнитные и ультразвуковые (акустические) поля, и среди них особенно перспективным считается применение ультразвуковых (УЗ) волн [1–5].

Исследования показывают, что после прекращения воздействия ультразвуковых волн происходит обратный процесс, называемый «реструктуризацией», который приводит к повторному

образованию асфальтено-смоло-парафиновых комплексов в нефти. Однако добавление небольших количеств депрессорных присадок в ультразвуковое поле позволяет предотвратить этот процесс. Однако современные присадки обладают рядом недостатков. А именно, они не универсальны и требуют отдельных лабораторных испытаний для каждой конкретной нефти. Их стоимость высока, применение может быть экономически невыгодным, а эффективность снижается при изменении внешних условий. Поэтому получение универсальных и эффективных химических реагентов комплексного действия, и исследование их применения в сочетании с ультразвуковыми полями является одной из важных и актуальных задач, стоящих перед современной нефтяной наукой [6–14].

Целью проведенной научно-исследовательской работы является изучение индивидуального и комплексного влияния физико-химических методов на реологические параметры образца высокопарафинистой и смолистой нефти в лабораторных условиях. Лабораторные исследования проводились на образце парафинистой и смолистой нефти с высокой вязкостью и высокой температурой застывания. Основные физико-химические показатели указанной нефти приведены в таблице. Во время ультразвуковой обработки использовалось устройство REOCALC с различными частотами (20–40 кГц) и амплитудами (10–50 мкм). Поскольку более низкие частоты создают большие и сильные кавитационные эффекты, диапазон частот 20–40 кГц считается наиболее оптимальным во время лабораторных экспериментов [16–18]. Ультразвуковые волны прикладывались к образцу нефти с различной мощностью и продолжительностью. Эксперименты проводились путем изменения этих параметров с целью определения оптимальных условий применения ультразвука. В экспериментах использовалась температура 20 °С для имитации реальных условий в нефтепроводах. Это связано с тем, что ожидается, что твердые парафиновые отложения будут образовываться больше при низких температурах. Применялись различные частоты (20–40 кГц), амплитуды (10–50 мкм) и время воздействия (15 минут, 20 минут, 25 минут). Реологические параметры нефти, особенно свойства потока, рассматривались с учетом изменений, связанных с каждым параметром. Вязкость образца нефти измеряли с помощью прибора «Реотест-Д». Сравнивали значения вязкости до и после ультразвуковой обработки [16–18].

Таблица. – Физико-химические характеристики образца масла

№	Параметры	Количество	Способ назначения
1	Количество воды в образце, %	0.1	ГОСТ 2477-65
2	Плотность, ρ_4^{20} кг/м ³	896.0	ГОСТ 3900-85
3	Количество парафина, %	12.6	ГОСТ 11851-85
4	Количество смолы, %	14.2	ГОСТ 11851-85
5	Содержание асфальтенов, %	3.2	ГОСТ 11851-85
6	Температура замерзания, °С	+15	ГОСТ 20287-91
7	Температура насыщения нефти парафином, °С	30	–
8	Температура плавления парафина, °С	58	ГОСТ 11858-83
9	Содержание серы, %	0.24	ГОСТ 1437-75
10	А/С	0.509	–

В ходе экспериментов пробу нефти, взятую в объеме 200–300 мл, нагревали в стальном реакторе при температуре 50 °С для добавления к нефти химического реагента. Взятую для исследования высокопарафинистую, смолистую пробу нефти термостатировали при температуре 20 °С в течение 30 минут до и после воздействия ультразвуковых волн. При методе комбинированного воздействия сначала добавляли депрессорную присадку, представляющую

собой химический реагент, а затем подвергали пробу нефти воздействию ультразвуковых волн. Следует отметить, что вязкость проб нефти проверяли каждые 5 часов в течение суток после воздействия ультразвуковых волн. Воздействие ультразвуковых волн на пробу нефти проводили в течение 0–15, 0–20 и 0–25 минут. Температуру замерзания пробы нефти определяли по известной методике [16–18]. Точность измерения температуры замерзания пробы нефти составила $\pm 0,2$ °С.

В качестве депрессорной присадки использовался препарат «Дифрон-4202» производства Российской Федерации. Присадка «Дифрон-4202» значительно снижает количество выпавшей массы, предотвращая образование асфальтено-смоло-парафиновых осадков в высокопарафинистых и смолистых нефтях при низких температурах. «Следует отметить, что при синхронном воздействии сначала в образец нефти добавлялось определенное количество депрессорной присадки, а затем образец нефти подвергался воздействию ультразвуковых волн [16–18].

В процессе исследований, проводимых в лабораторных условиях, впервые изучалось влияние ультразвуковых волн на температуру замерзания образца высокопарафинистой и смолистой нефти. Продолжительность воздействия ультразвука увеличивалась до определения оптимального времени воздействия. Этот период составлял 15, 20 и 25 минут, при этом для взятого образца нефти оптимальным временем воздействия было определено 25 минут.

Установлено, что в течение 15 минут воздействия ультразвуковых волн температура замерзания образца нефти снижается с $+15$ °С до $+3$ °С. Это свидетельствует о снижении температуры замерзания нефти на 80%. Увеличение времени воздействия ультразвука с 15 до 20 минут снижает температуру замерзания образца нефти еще на $+3$ °С до 0 °С. Так, воздействуя на образец нефти в течение 20 минут, ультразвук снижает его температуру замерзания на 100%. В течение 25 минут воздействия ультразвуковых волн его температура замерзания резко снижается. Так, в течение 25 минут воздействия ультразвука температура замерзания образца нефти с высоким содержанием парафинов снижается с $+15$ °С до (-3) °С. Однако установлено, что воздействие более 25 минут неэффективно. Поскольку за это время температура замерзания нефти не опускалась ниже (-3) °С и просто вызывало потерю энергии ультразвука. Поэтому было принято, что оптимальное время воздействия ультразвуковых волн на исследуемое масло составляет 25 минут.

В ходе экспериментов, проводимых по изучению влияния физико-химических методов на температуру замерзания образца масла в индивидуальном виде, были проведены исследования по индивидуальному изучению влияния депрессорной присадки «Дифрон-4202» в химическом методе после воздействия ультразвуковых волн. Для этого использовались концентрации присадки 100, 200, 300, 400, 500, 600 и 700 ppm. Установлено, что под воздействием 50, 100, 150, 200, 250 и 300 ppm присадки температура замерзания масла снижается с $+15$ °С до $+13,6$ °С, $+12,4$ °С, $+10,2$ °С, $+9,6$ °С, $+8,7$ °С, $+8$ °С соответственно. При увеличении концентрации депрессорной присадки «Дифрон-4202» свыше 300 ppm, а точнее, под воздействием 350, 400, 450 и 500 ppm, температура замерзания высокопарафинистых нефтей снижается с $+15$ °С до $+7,4$ °С, $+6,8$ °С, $+6$ °С и $+5,3$ °С соответственно. Для достижения более эффективного результата количество добавляемой в масло депрессорной присадки было увеличено еще на 200 ppm до 700 ppm. Установлено, что с увеличением количества добавляемой в масло присадки, а точнее, под воздействием 550 ppm, 600 ppm, 650 ppm и 700 ppm температура замерзания образца масла снижается с $+15$ °С до $+4,8$ °С, $+4,2$ °С, $+3,8$ °С и, наконец, $+3,4$ °С соответственно. Следует отметить, что при добавлении более 700 ppm депрессорной присадки «Дифрон-4202» значение температуры замерзания оставалось стабильным, не опускаясь ниже $+3,4$ °С. Такой результат дал основание говорить о том, что оптимальная концентрация депрессорной присадки «Дифрон-4202» для исследуемого образца масла составила 700 ppm. После изучения влияния

ультразвуковых волн и депрессорной присадки «Дифрон-4202» на температуру замерзания образца масла по отдельности, было также изучено совместное действие указанных методов. Собраны и проанализированы результаты многочисленных экспериментов, проведенных в лабораторных условиях. Установлено, что оптимальная продолжительность ультразвукового воздействия при синхронном воздействии составляет 20 минут, а оптимальная концентрация присадки – 350 ppm. Результаты синхронного воздействия представлены на графике ниже.

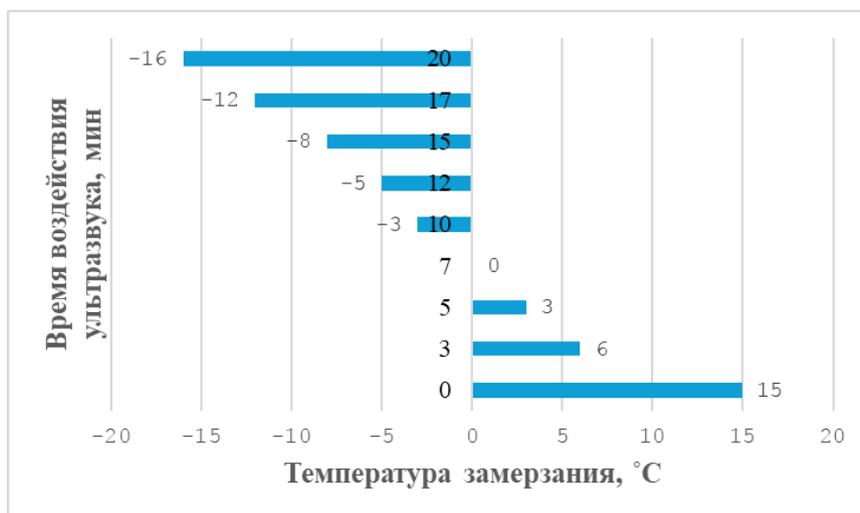


График. – Синхронное воздействие ультразвука (20 мин) + депрессорной присадки (350 г/т) на температуру замерзания нефти

Характер кривой, отраженной на графике, показывает, что в отличие от воздействия ультразвука и присадок синхронное воздействие оказывается достаточно эффективным, и в данном случае температура замерзания образца масла снижается с +15 °C ровно до (-16) °C.

РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Исследовано влияние ультразвуковых волн на температуру замерзания образца высокопарафинистой смолистой нефти. Установлено, что с увеличением времени воздействия ультразвуковых волн температура замерзания нефти существенно снижается. Так, в результате 25-минутного воздействия температура замерзания нефти снизилась с +15°C до (-3)°C, и определено оптимальное время воздействия ультразвука для исследуемого образца нефти, равное 25 минутам.

2. При индивидуальном воздействии депрессорной присадки «Дифрон-4202» установлено, что температура замерзания нефти снижается с увеличением концентрации присадки. Однако при увеличении концентрации выше 700 г/т дополнительного эффекта не наблюдалось. Таким образом, определена оптимальная концентрация депрессорной присадки «Дифрон-4202» для исследуемого образца нефти, равная 700 ppm.

3. При синхронном воздействии ультразвука и присадки «Дифрон-4202» установлено, что в результате синергетического эффекта температура замерзания масла снижается еще больше, а оптимальный показатель достигнут при 20-минутном воздействии ультразвука и концентрации присадки 350 ppm. При этом температура замерзания снизилась с +15°C до (-16)°C, что является наивысшим показателем по сравнению с раздельным воздействием.

ЛИТЕРАТУРА

1. Alhejaili A., Bell E., Daraboina N., 2023. Paraffin Deposition in Production Lines: Effect of Operating Parameters on Deposition Characteristics. Energy & Fuels, 37(23): 18642–18651. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.3c03282.

2. Alhejaili A., Bell E., Daraboina N., 2023. Paraffin Deposition in Production Lines: Effect of Operating Parameters on Deposition Characteristics. *Energy & Fuels*, 37(23): 18642–18651. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.3c03282.
3. Brian F. Towler; Ashok Kumar Chejara; Saeid Mokhatab, 2007. Experimental Investigations of Ultrasonic Waves Effects on Wax Deposition during Crude-Oil Production. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, SPE-109505-MS.
4. Gurbanov G.R., Gasimzade A.V., 2022. Research of the impact of new compositions on the decomposition of stable water-oil emulsions of heavy oils. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*, 6: 19–28.
5. Gurbanov G.R., Gasimzade A.V., Abbasova L.A., 2024a. Investigation of the effect of the combined methods on the rheological properties of high-paraffin oils. *Nafta-Gaz*, 80(7): 427–433. DOI: 10.18668/NG.2024.07.04.
6. Otumudia E., Hamidi H., Jadhawar P., Wu K., 2022. The Utilization of Ultrasound for Improving Oil Recovery and Formation Damage Remediation in Petroleum Reservoirs: Review of Most Recent Researches. *Energies*, 15(13): 4906. DOI: 10.3390/en15134906.
7. Loskutova Y.V., Yudina N.V., 2006. Rheological behaviour of oils in magnetic field. *Engineering Physical Journal*, 1: 102–110.
8. Palaev A.G., Dzhemilev E.R., 2020. Research of Efficiency of Influence of Ultrasonic Treatment on Asphalt and Paraffin Oil Deposits. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 862: 032081. DOI: 10.1088/1757-899X/862/3/032081.
9. Pavlova S.N., Cheremisin A.N., Riazi M., Razavifar M., 2022. Combined Effect of Ultrasonic Irradiation and Pour Point Depressant on Rheological Properties of High-Paraffin Crude Oil. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 214: 110553, 112–118. DOI: 10.1016/j.petrol.2022.110553.
10. Qajar J., Razavifar M., Riazi M., 2022. Experimental Study on Pore-Scale Mechanisms of Ultrasonic-Assisted Heavy Oil Recovery with Solvent Effects. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 214: 110553. DOI: 10.1016/j.petrol.2022.110553.
11. Razavifar M., Yunusov T., Mukhametdinova A., Bakulin D., Qajar J., Cheremisin A., Riazi M., 2025. Improving Oil Recovery with Ultrasound: Mitigating Asphaltene-Induced Formation Damage. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 15: Article. DOI: 10.1007/s13202-025-01985-X.
12. Savulescu G.C., Simon S., Humborstad Sørland G., Qye G., 2023. Understanding the Effect of Asphaltenes and Wax Inhibitors on Wax Crystallization by Improved NMR Techniques. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 62(44): 18251–18262. DOI: 10.1021/acs.iecr.3c02218.
13. Taheri-Shakib J., Shekarifard A., Naderi H., 2018. Experimental Investigation of the Asphaltene Deposition in Porous Media: Accounting for the Microwave and Ultrasonic Effects. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 163: 122–135. DOI: 10.1016/j.petrol.2018.01.017.
14. Zhang H., Gao C., Song N., Cao Q., 2024. Revisiting the Application of Ultrasonic Technology for Enhanced Oil Recovery: Mechanisms and Recent Advancements. *Energies*, 17(14): 3517. DOI: 10.3390/en17143517.