

УДК 665.61

## ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ НА СВОЙСТВА ВОДОНЕФТЯНЫХ ЭМУЛЬСИЙ

© 2025 г. Г. И. Волкова<sup>1,\*</sup>, Е. Ю. Смирнова<sup>1,\*\*</sup>

<sup>1</sup>ФГБУН Институт химии нефти СО РАН (ИХН СО РАН), 634055 Томск, Россия

\*e-mail: galivvol@yandex.ru

\*\*e-mail: smirnova.chemtsu@gmail.com

Поступила в редакцию 13.12.2024 г.

После доработки 13.12.2024 г.

Принята к публикации 05.02.2025 г.

Исследовано влияние режимов ультразвуковой обработки на микроструктуру и структурно-реологические свойства эмульсий нефтей с дистиллированной и пластовой водами. Эмульсии обрабатывали в ультразвуковом поле (частота 22 кГц, интенсивность 2, 6 и 18 Вт/см<sup>2</sup>). Микроструктуру эмульсий изучали с использованием оптического микроскопа *AXIO LAB.A1 (Carl Zeiss, Германия)*. Проведен дисперсионный анализ микрофотографий эмульсий и выявлено влияние условий обработки, типа дисперсной фазы на средний размер частиц, дисперсность и положение максимума распределения капель воды в эмульсии по размерам. Реологические параметры эмульсий до и после ультразвуковой обработки изучали с использованием ротационного вискозиметра *HAAKE Viscotester iQ (ThermoScientific, США)*. Для высоковязкой нефти с высоким содержанием смолисто-асфальтеновых компонентов после УЗО в импульсном режиме при интенсивности поля 6 Вт/см<sup>2</sup> и 2 режимах (5 циклов с 10 с работы и 10 с покоя; 10 циклов с 5 с работы и 5 с покоя) наблюдается снижение степени дисперсности капель воды.

Ключевые слова: нефть, эмульсия, ультразвуковая обработка, дисперсионный анализ, вязкость, энергия разрушения дисперсной системы

DOI: 10.31857/S0023117725010074 EDN: KTTGAQ

### ВВЕДЕНИЕ

Кавитация является одним из основных факторов воздействия ультразвуковых колебаний на коллоидные системы. Ее действие позволяет ускорять многочисленные технологические процессы, связанные с изменением структуры и свойств жидких материалов [1]. Однако кавитация может оказывать отрицательное воздействие в тех случаях, когда ультразвуковые колебания создают направленное стимулирующее и объединяющее воздействие [2, 3]. К таким процессам, в частности, относится разрушение эмульсий. Установлено, что при непрерывном синусоидальном воздействии [4] возможно образование схлопывающихся кавитационных

пузырьков при интенсивностях ультразвука, начиная от 0.3 Вт/см<sup>2</sup> (в воде). Таким образом, невозможно вводить и распространять на дальние расстояния большие количества энергии и при этом эффективно реализовывать процессы, не допускающие возникновения кавитации [1]. Решением проблемы может стать использование коротких ультразвуковых импульсов [3, 5]. В этом случае формируемые ультразвуковые импульсы будут представлять собой следующие друг за другом волновые пакеты конечной длительности, большей, чем период ультразвуковых колебаний, но меньшей, чем период следования пакетов. Как показали эксперименты [3, 6], такое импульсное воздействие приводит к уменьшению кавитации при одновременном введении

эквивалентного количества акустической энергии, как и при непрерывной обработке.

Авторы [3] показали, что импульсное ультразвуковое облучение обеспечивает лучшую коалесценцию капель воды и, соответственно, обезвоживание отработанного масла по сравнению с обычным непрерывным ультразвуковым облучением. После импульсного ультразвукового облучения содержание воды в отработанном масле может быть снижено до 8 мас. %. При использовании импульсного ультразвукового облучения сокращается время обезвоживания отработанного масла с нескольких дней до 3 ч. Для достижения наилучшего результата существуют оптимальные параметры ультразвукового облучения. Степень влияния различных факторов определяется в следующем порядке: частота > время облучения > время цикла > мощность звука > отношение длительности импульса. Оптимальные технологические условия следующие: мощность звука – 90 Вт; время цикла – 10 мс; коэффициент длительности импульсов – 0.6; частота – 10 кГц; время облучения – 6 мин.

В работе [7] считают, что для реализации процесса ультразвуковой коагуляции жидкодисперсных систем воздействие необходимо осуществлять в режиме, близком к докавитационному, чтобы избежать вторичного разрушения образующихся глобул воды и диспергирования дисперсной фазы. Поддержание устойчивого докавитационного режима требует ограничения интенсивности ультразвуковых колебаний, что снижает возможности ультразвуковой коагуляции [8]. В работе [8] для увеличения вводимой в эмульсию акустической энергии без развития кавитационного режима ультразвуковое воздействие осуществлялось в импульсном режиме. Обработка велась ультразвуком в течение трех часов с частотой 13–14 кГц с последующим гравитационным отстоем в течение трех часов. На режиме работа–пауза 95/5 достигнуты наилучшие показатели качества: снижение обводненности с 1.4 до 1.0 мас. % и снижение

содержания хлористых солей с 495 до 320 мг/дм<sup>3</sup>. В ходе экспериментов установлено, что при температуре эмульсии 60°C достигается оптимальная эффективность технологического процесса. С увеличением температуры межфазное натяжение и вязкость эмульсии (нефти) значительно снижаются. Уменьшение межфазного натяжения способствует коалесценции дисперсных капель.

Эффективность применения импульсного воздействия подтверждена на основании анализа модели ультразвуковой коагуляции в жидкодисперсных средах при воздействии в импульсном режиме. Установлено, что длительность импульса не должна превышать 3 мс, а период следования импульса должен быть не менее 1.2 от длительности последнего [8]. Это позволяет увеличить ультразвуковую энергию, обеспечивающую поддержание устойчивого докавитационного режима, в 1.5 раза. Сравнительные расчеты эффективности ультразвуковой коагуляции жидкодисперсных систем в непрерывном и импульсном режиме позволили установить, что в жидкости с вязкостью 100 мПа·с коагуляция частиц при импульсном ультразвуковом воздействии происходит до 1.5 раз эффективнее по сравнению с непрерывным воздействием.

Цель настоящей работы: изучить влияние режима ультразвуковой обработки на свойства водонефтяных эмульсий нефтей различного вещественного состава.

## ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследовали 30 мас. % водонефтяные эмульсии (ВНЭ) 2 нефтей, физико-химические характеристики и вещественный состав которых представлены в табл. 1. Высоковязкая очень тяжелая нефть УН содержит 20.2 мас. % смолисто-асфальтеновых веществ. Нефть СК – средней плотности, содержит 9.5 мас. % смолисто-асфальтеновых веществ.

В качестве дисперсной фазы использовали дистиллированную (ДВ) или пластовую соленую

**Таблица 1.** Физико-химические характеристики и вещественный состав нефтей

Нефть	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Кинематическая вязкость при 20°C, мм <sup>2</sup> /с	T <sub>з</sub> , °C	Содержание, мас. %		
				масла	смолы	асфальтены
УН	972	3861	–14.0	79.8	16.9	3.3
СК	873	58	+8.8	90.5	9.2	0.3

воду (ПВ) с минерализацией 12 г/дм<sup>3</sup> и повышенным содержанием хлористых солей натрия и карбонат-ионов. Ионный и солевой состав пластовой воды представлен в табл. 2.

**Таблица 2.** Ионный и солевой состав пластовой воды

Показатель	Значение
pH	6.8
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	1005
Общая минерализация, г/дм <sup>3</sup>	12.0
Содержание ионов: мг/дм <sup>3</sup>	
Ca <sup>2+</sup>	105
Mg <sup>2+</sup>	35.6
Na <sup>+</sup>	3447
K <sup>+</sup>	127
NH <sub>3</sub> <sup>+</sup>	440
Cl <sup>-</sup>	7552
I <sup>-</sup> + Br <sup>-</sup>	4.96+21.4
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	5.68
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	304
CO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	<10.0

Эмульсии готовили при комнатной температуре с использованием лопастной верхнеприводной мешалки *ES-8300D* (ООО “ЭКРОСХИМ”, Россия) при скорости оборотов 1500 об./мин в течение 10 мин.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

**Ультразвуковая обработка.** Ультразвуковую обработку (УЗО) исходной ВНЭ проводили с использованием ультразвуковых диспергаторов *УЗДН-2Т* (“УкрРосПрибор”, Россия) и *UD-20* (*Techrap*, Польша), работающих на частоте 22 кГц. Интенсивность ультразвука — 18 Вт/см<sup>2</sup> (*УЗДН-2Т*) и 2–6 Вт/см<sup>2</sup> (*UD-20*) в непрерывном и в импульсных режимах при комнатной температуре. Импульсный режим состоял из 5 или 10 циклов, включающих 1–10 с работы и последующие 1–10 с паузы. Введены следующие сокращения: 5 (5 × 5) (5 циклов с 5 с работы и 5 с паузы), 10 (5 × 5) (10 циклов с 5 с работы и 5 с паузы), 5 (10 × 10) (5 циклов с 10 с работы и 10 с паузы) и т.д.

**Температура застывания.** Определение температуры застывания нефти (Т<sub>з</sub>) осуществляли на приборе *ИНПН “Кристалл” SX-800* (ИХН СО РАН, Россия). Предел погрешности определения температуры образца составляет ±0.2°С.

**Микроструктура ВНЭ.** Микроструктуру ВНЭ исследовали с использованием метода оптической микроскопии в проходящем свете на микроскопе *AXIO LAB.A1* (Carl Zeiss, Германия). Полученные микрофотографии обрабатывали с помощью программ *Zen* и *Axio Vision* от Zeiss. Эмульсию нефти подвергали УЗО при различных режимах, выдерживали в цилиндрах при комнатной температуре в течение 1 ч, а затем отбирали пробу для микроскопического анализа из верхнего слоя образца.

**Дисперсионный анализ ВНЭ.** Строили дифференциальные кривые распределения капель по размерам на основании диаметров 300 капель воды. Применение дисперсионного анализа позволяет определить наличие различий между средними значениями и оценить влияние исследуемого фактора на зависимую переменную. Определены средний размер капель, дисперсность каждой системы, положение максимума и его смещение по сравнению с максимумом дифференциальной кривой для исходной ВНЭ [9].

**Реометрия.** Реологические свойства ВНЭ исследовали с использованием ротационного вискозиметра *HAAKE Viscotester iQ* (*ThermoScientific*, США). Для определения влияния режима УЗО на реологические свойства исследуемых эмульсий нефти сняты изотермические кривые течения прямого и обратного хода в интервале скоростей сдвига 0–85 с<sup>-1</sup> в течение 800 с при температуре 20°С. Полученные измерения обрабатывали с помощью встроенного программного обеспечения *Rheocalc*. Удельную внутреннюю энергию разрушения структуры эмульсии рассчитывали согласно [10].

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

**Эмульсии нефти УН.** Средний размер капель пластовой воды (ПВ) в исходной ВНЭ больше, чем дистиллированной (ДВ), а максимум распределения капель ПВ сдвинут в область более крупных частиц (табл. 2).

УЗО эмульсии с ДВ, независимо от интенсивности поля, приводит к диспергированию капель воды (табл. 2) средний размер капель снижается в 1.8–2.4 раза, максимум распределения частиц по размерам смещается в область более мелких частиц на 7.5–9.5 мкм. Более широкое варьирование условий УЗО в импульсном режиме или при кратковременной обработке,

при которой наблюдается слабая кавитация, проведено на примере эмульсии нефти УН с ПВ (табл. 2).

Кратковременная обработка (20, 40, 60 с) ВНЭ при 6 и 18 Вт/см<sup>2</sup> приводит к диспергированию капель исходной эмульсии, причем чем дольше УЗО, тем выше степень дисперсности, повышающаяся за счет раздробления крупных частиц (табл. 2, рис. 1). Эмульсии, обработанные при 18 Вт/см<sup>2</sup>, имеют более узкое распределение, максимум сильнее сдвинут в область более мелких частиц.

Обработка в импульсном режиме 5 (5 × 5) при интенсивности поля 2, 6 и 18 Вт/см<sup>2</sup> способствует значительному увеличению степени дисперсности со сдвигом максимума распределения на 7.5–9.5 мкм в область меньшего диаметра водных капель (табл. 3). Увеличение количества циклов или времени “работа–пауза” при импульсной обработке (режимы 6/5 (10 × 10), 6/10 (5 × 5) и 18/5 (10 × 10)) способствуют коалесценции капель воды (рис. 2, рис. 3).

*Реологические параметры эмульсии нефти УН. Кратковременная УЗО при 18 Вт/см<sup>2</sup>*

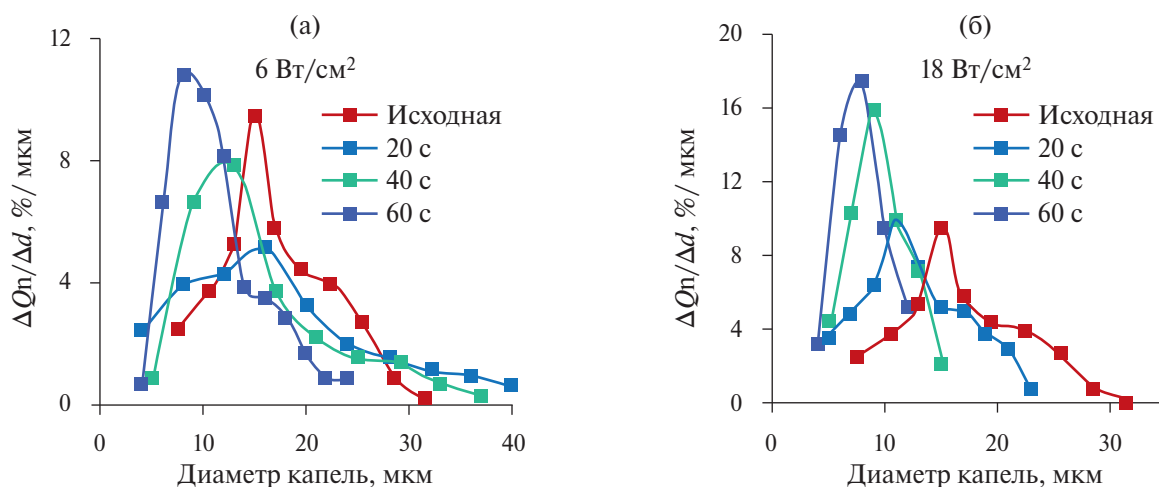


Рис. 1. Дифференциальные кривые распределения капель воды по размерам после кратковременной УЗО эмульсии нефти УН интенсивностью 6 (а) и 18 (б) Вт/см<sup>2</sup>.

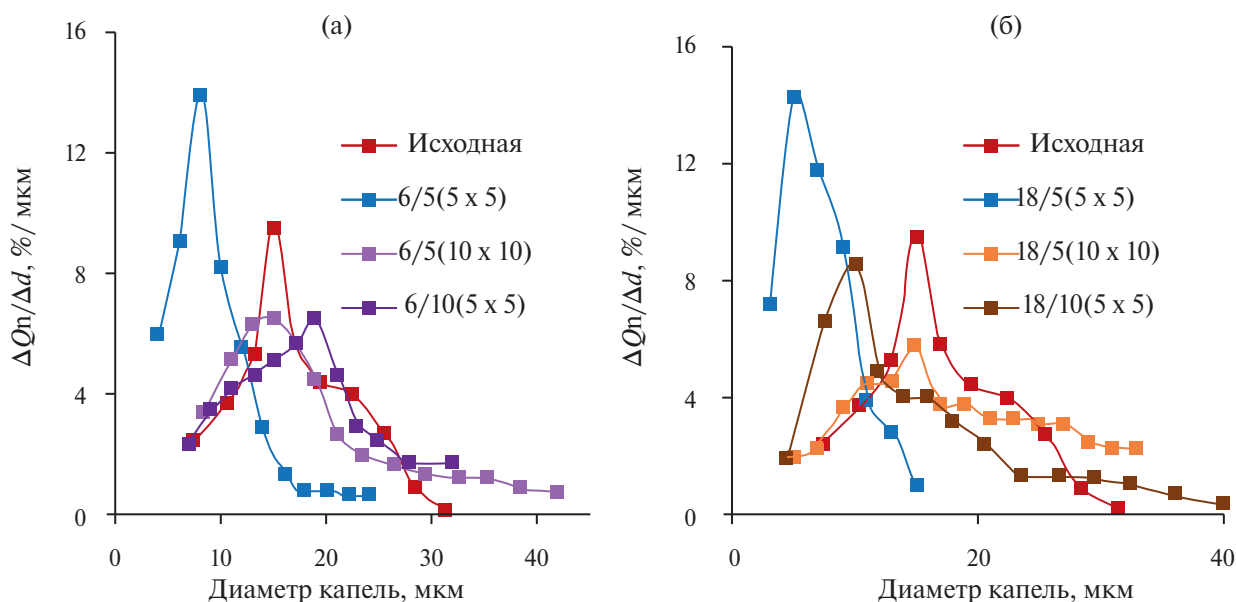


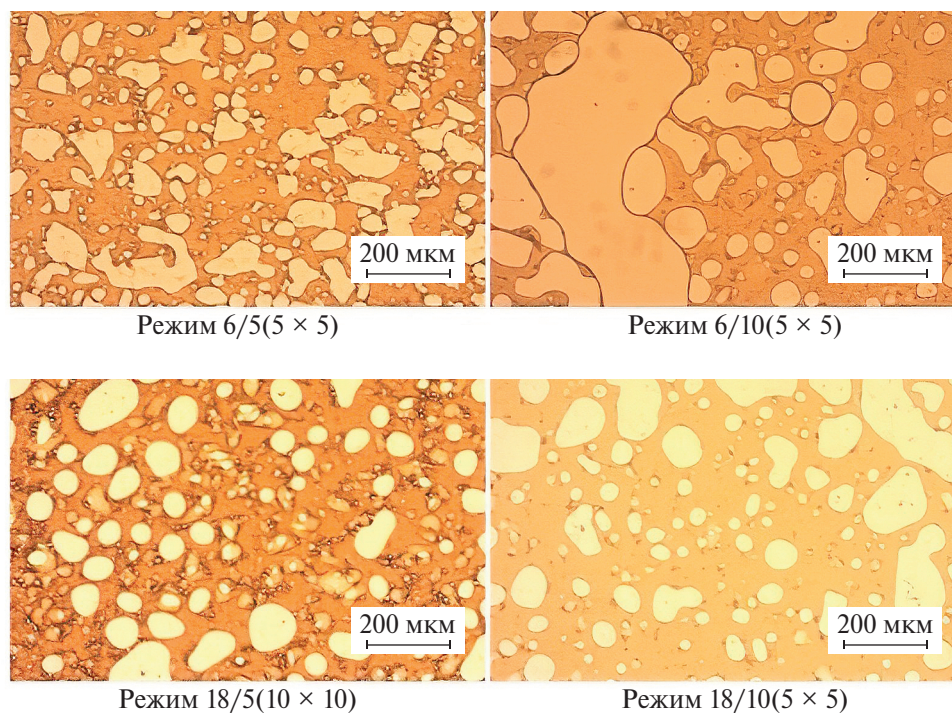
Рис. 2. Дифференциальные кривые распределения капель воды по размерам после импульсной УЗО эмульсии нефти УН с пластовой водой: 6 (а) и 18 (б) Вт/см<sup>2</sup>.

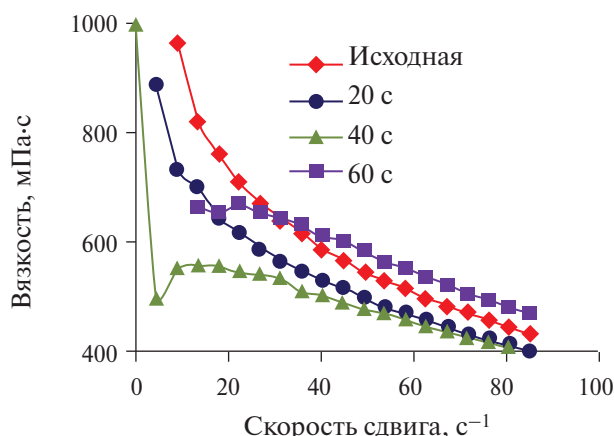


**Таблица 3.** Дисперсионный анализ 30 мас. % ВНЭ нефти УН, подвергнутой обработке ультразвуковым полем

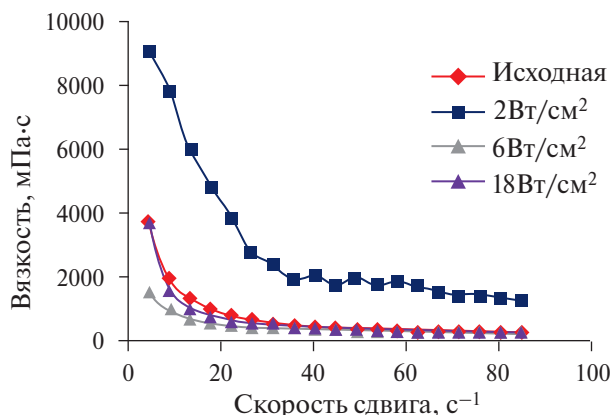
Режим УЗО, интенсивность Вт/см <sup>2</sup> / режим	Средний размер капель, мкм	Дисперсность, мкм <sup>-1</sup>	Положение максимума, мкм	Смещение максимума относительно исх. ВНЭ, мкм
Дистиллированная вода				
Исходная	13.4	0.07	14.0	Нет
2/5 (5 × 5)	6.4	0.16	6.5	–7.5
6/5 (5 × 5)	5.7	0.18	4.5	–9.5
18/5 (5 × 5)	7.4	0.13	5.5	–8.5
Пластовая вода				
Исходная	16.3	0.06	15.0	Нет
2/5 (5 × 5)	14.2	0.07	12.0	–3.0
6/20 с	17.0	0.06	16.0	1.0
6/40 с	15.4	0.06	13.0	–2.0
6/60 с	11.3	0.09	8.0	–7.0
6/5 (5 × 5)	5.7	0.18	4.5	–9.5
6/5 (5 × 5)	9.3	0.11	8.0	–7.0
<b>6/5 (10 × 10)</b>	<b>19.3</b>	<b>0.05</b>	<b>15.0</b>	<b>0.0</b>
<b>6/10 (5 × 5)</b>	<b>18.1</b>	<b>0.06</b>	<b>19.0</b>	<b>4.0</b>
18/20 с	12.8	0.08	11.0	–4.0
18/40 с	9.5	0.11	9.0	–6.0
18/60 с	7.9	0.13	7.5	–7.5
18/5 (5 × 5)	6.6	0.15	5.0	–10.0
18/5 (10 × 10)	17.4	0.06	15.0	0.0
18/10 (5 × 5)	15.6	0.06	10.0	–5.0

Примечание: 5 (5 × 5) – 5 циклов (5 с работа, 5 с пауза); 10 (5 × 5) – 10 циклов (5 с работа, 5 с пауза); 5 (10 × 10) – 5 циклов (10 с работа, 10 с пауза).

**Рис. 3.** Микрофотографии эмульсии с ПВ после УЗО с интенсивностью поля 6 и 18 Вт/см<sup>2</sup>.

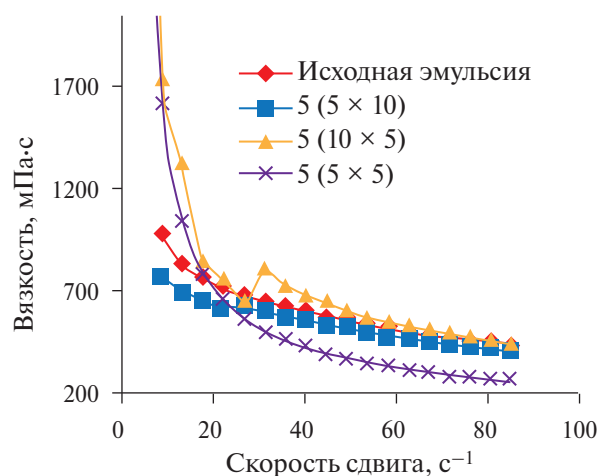


**Рис. 4.** Влияние времени УЗО на вязкость эмульсии с ПВ в отсутствие резонанса при интенсивности 18 Вт/см<sup>2</sup>.



**Рис. 6.** Влияние интенсивности ультразвука на вязкость эмульсии с ПВ после импульсной обработки 5 (5 × 5).

в отсутствие резонанса в течение 20 и 40 с способствует снижению вязкости ВНЭ (рис. 4). После 40 с воздействия вязкость эмульсии при скорости сдвига 4 с<sup>-1</sup> падает с 3700 до 499 мПа·с. УЗО в импульсном режиме, при котором было 5 циклов, а менялось время работы и паузы, проведена при интенсивности поля 18 Вт/см<sup>2</sup>. Наблюдали снижение вязкости во всем интервале скоростей сдвига при режиме 5 (5 × 10) (рис. 5). Вязкость ВНЭ, обработанной при режиме 5 (5 × 5), резко снижается при увеличении скорости сдвига, что может быть обусловлено агрегацией капель воды в процессе реологического исследования. Независимо от интенсивности



**Рис. 5.** Влияние режима УЗО на вязкость эмульсии с ПВ в отсутствие резонанса при интенсивности 18 Вт/см<sup>2</sup>.

поля вязкость ВНЭ снижается при проведении УЗО в режиме 5 (5 × 5) (рис. 6).

*Эмульсия нефти СК.* Эмульсия малосмолистой нефти СК, содержащая 30 мас. % дистиллированной воды, обработана в непрерывном режиме при интенсивности поля 6 и 18 Вт/см<sup>2</sup> в течение 5 мин и импульсном режиме (варьировались количество циклов и продолжительность работы и паузы). Обработка в непрерывном режиме приводит к повышению эффективной вязкости при 4 с<sup>-1</sup> в 6.5 и 3.8 раз при 6 и 18 Вт/см<sup>2</sup> соответственно по сравнению с исходной эмульсией (табл. 4). В области устоявшегося течения (скорость сдвига 40 с<sup>-1</sup>) рост вязкости ВНЭ не столь значителен, но тем не менее она увеличивается в 3.4–4.2 раза по сравнению с исходной эмульсией. Резкое снижение вязкости и положительное высокое значение  $\Delta W$  для эмульсии, обработанной 5 мин при 6 Вт/см<sup>2</sup>, может быть обусловлено агрегированием капель воды в процессе снятия кривой течения обратного хода петли гистерезиса (табл. 4, рис. 7,а). Капли воды ВНЭ после УЗО в течение 5 мин при 18 Вт/см<sup>2</sup>, напротив, диспергируют, что приводит к значительному увеличению вязкости, а  $\Delta W$  имеет отрицательное значение (табл. 4, рис. 7,б).

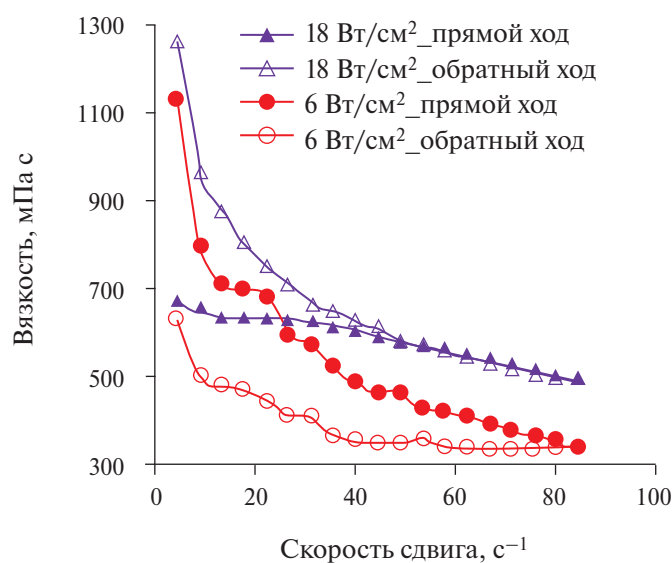
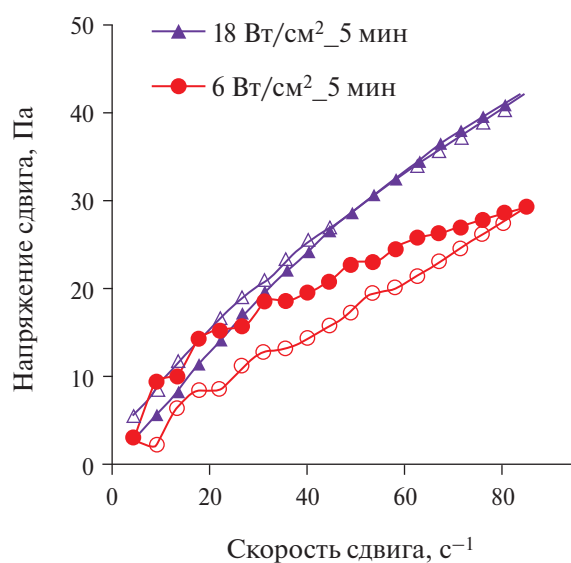
Согласно данным микроскопии исходная эмульсия представлена, в основном, каплями воды 1–12 мкм (рис. 8, рис. 9,а). Под влиянием ультразвука интенсивностью 18 Вт/см<sup>2</sup> в течение 5 мин в непрерывном режиме происходит диспергирование первичных капель воды. Дисперсность частиц возрастает с 0.15 до 0.37 мкм<sup>-1</sup>,

**Таблица 4.** Влияние УЗО на вязкость и удельную энергию разрушения ВНЭ с нефтью СК

Образец	Вязкость, МПа·с		$\Delta W$ , кДж/м <sup>3</sup>
	скорость сдвига 4 с <sup>-1</sup>	скорость сдвига 40 с <sup>-1</sup>	
Исходная эмульсия	175	145	–1.7
Интенсивность УЗО 6 Вт/см <sup>2</sup>			
5 мин	1133	489	4.6
5 (1 × 1)	379	144	–1.4
5 (5 × 5)	202	150	–1.6
5 (10 × 10)	199	164	–1.4
10 (1 × 1)	267	159	–1.1
10 (5 × 5)	231	165	–1.5
Интенсивность 18 Вт/см <sup>2</sup>			
5 мин	672	609	–5.6
5 (1 × 1)	168	157	–2.0
10 (1 × 1)	239	159	–1.1

(а)

(б)

**Рис. 7.** Реологические кривые ВНЭ с нефтью СК после УЗО: (а) — кривые течения прямого и обратного хода, (б) — зависимость вязкости от скорости сдвига ВНЭ, обработанной 5 мин при 6 и 18 Вт/см<sup>2</sup>.

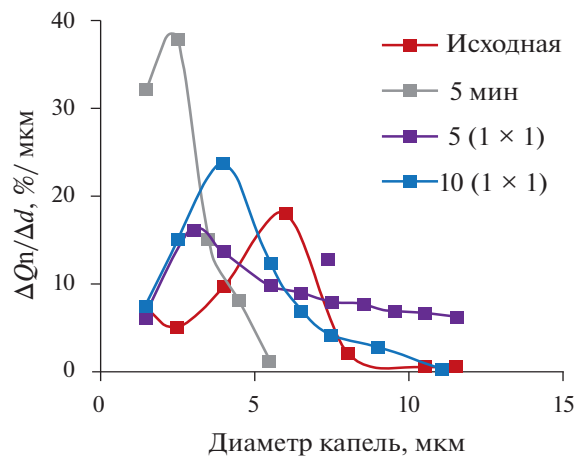


Рис. 8. Дифференциальные кривые распределения капель воды по размерам после УЗО эмульсии нефти СК при 18 Вт/см<sup>2</sup>.

а максимум распределения капель воды сдвигается на 3.5 мкм в сторону более мелких (табл. 4). Причем наравне с мелкими каплями воды присутствуют области прямой эмульсии (рис. 9б). В импульсных режимах процессы диспергирования и агрегирования конкурируют и появляется достаточное количество крупных частиц размером до 200 мкм (режим 5 (1 × 1)) (рис. 9,в). В течение 1 ч капли агрегируют с образованием множественной эмульсии (рис. 9,г).

Импульсный режим при интенсивности 6 Вт/см<sup>2</sup> приводит к образованию множественной эмульсии, в которой мелкие капли размером 1–5 мкм соседствуют с крупными водными образованиями до 200 мкм (рис. 9,д). Крупные капли с течением времени агрегируют (рис. 9,е).

Таблица 5. Дисперсионный анализ 30 мас. % ВНЭ нефти СК с дистиллированной водой, подвергнутой обработке ультразвуковым полем

Режим УЗО, интенсивность Вт/см <sup>2</sup> /режим	Средний размер капель, мкм	Дисперсность, мкм <sup>-1</sup>	Положение максимума, мкм	Смещение максимума относительно исх. ВНЭ, мкм
Исходная	6.5	0.15	6.0	Нет
18/5 мин	2.7	0.37	2.5	–3.5
18/5 (1 × 1)	6.0	0.17	4.0	–2.0
18/10 (1 × 1)	4.5	0.22	4.0	–2.0

Примечание: 5 (1 × 1) – 5 циклов (1 с работа, 1 с пауза); 10(1 × 1) – 10 циклов (1 с работа, 1 с пауза).

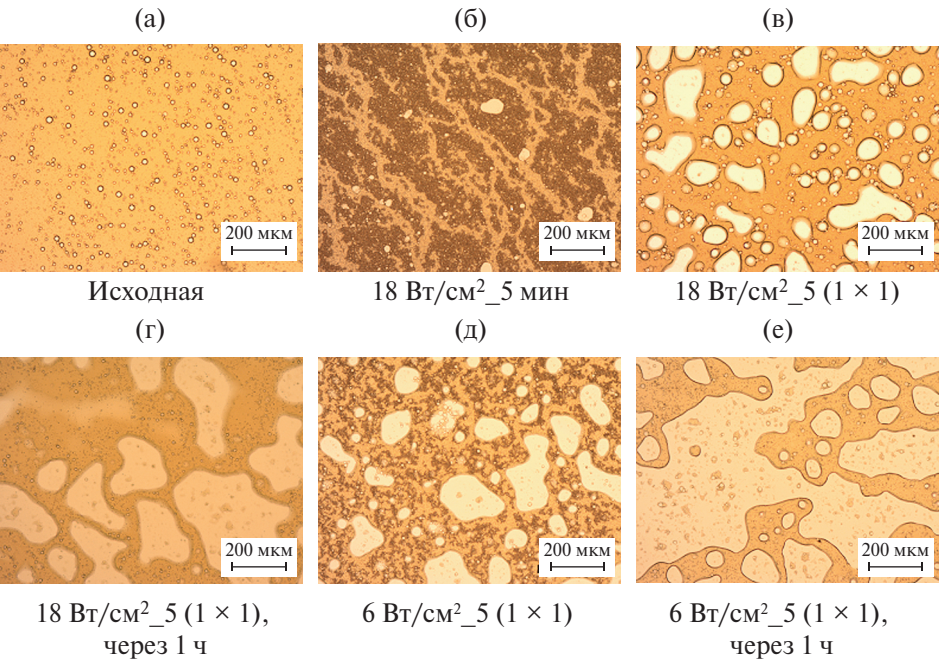


Рис. 9. Микрофотографии эмульсии нефти СК.



Несмотря на то, что импульсная обработка стимулирует коалесценцию капель воды, расслоение эмульсии при комнатной температуре в течение 1 ч не наблюдается.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследовано влияния режима ультразвуковой обработки на коллоидные свойства 30 мас. % водонефтяных эмульсий. Дисперсную фазу формировали с помощью пластовой или дистиллированной воды, дисперсионную среду – с использованием двух образцов нефти различного вещественного состава. В отсутствии резонанса при интенсивности поля 6 Вт/см<sup>2</sup> кратковременная обработка в течение 20 с позволила стимулировать коалесценцию капель пластовой воды в эмульсии высоковязкой тяжелой нефти УН. После обработки этой эмульсии при интенсивности поля 6 Вт/см<sup>2</sup> и 2 импульсных режимах 5 (10 × 10) и 10 (5 × 5) увеличился средний размер капель пластовой воды с 16.3 до 19.3 и 18.1 мкм.

УЗО в импульсном режиме эмульсий более легкой нефти СК способствует коалесценции капель воды с формированием множественной эмульсии.

При обработке эмульсий в импульсных режимах процесс коалесценции капель воды, вероятно, конкурирует со вторичным диспергированием, что может привести к увеличению среднего размера капель. Вязкость эмульсий, обработанных в импульсном режиме, ниже, чем после непрерывного режима.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета ФГБУН Институт химии нефти Сибирского отделения Российской академии наук. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голых Р.Н., Минаков В.Д. // Южно-сибирский научный вестник. 2023. № 1 (47). С. 61-6. [Yuzhno-sibirskij nauchnyj vestnik, 2023, no. 1 (47), p. 61]. <https://doi.org/10.25699/SSSB.2023.47.1.001>
2. Голых Р.Н., Боброва Г.А., Хмелев В.Н., Барсуков Р.В., Генне Д.В., Абраменко Д.С., Шакура В.А., Туттов Г.А., Ильченко Е.В. // Южно-Сибирский научный вестник. 2020. № 2. С. 57. [Yuzhno-sibirskij nauchnyj vestnik, 2020, no. 2, p. 57].
3. Xie W., Li R., Lu X. // Ultrason Sonochem. 2015. Sep 26. P. 136. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultsonch.2015.03.004>.
4. Хмелев В.Н., Сливин А.Н., Барсуков Р.В., Цыганок С.Н., Шалунов А.В. Применение ультразвука высокой интенсивности в промышленности. Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2010. 203 с.
5. Хмелев В.Н., Барсуков Р.В., Леонов Г.В., Ильченко Е.В. // XV Международная конференция-семинар молодых специалистов по микро- и нанотехнологиям и электронным устройствам EDM' 2014. 2014. P. 217.
6. Атхлей А.А., Атчи А.А., Фриззель Л.А., Анфель Р.Е., Холланд К.К., Маданшетти С., Рой Р.А. // Ультразвук. 1988. Том 26. Выпуск 5. С. 280. [Ul'trazvuk., 1988, no. 5, p. 280].
7. Лекомцев А.В., Мордвинов В.А., Дворецкас Р.В., Степаненко И.Б., Баканеев В.С., Силичев М.А., Корнилов К.В. // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 332. № 5. С. 101. [Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov., 2021, V. 332, no. 5, p. 101] <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/05/3189>
8. Хмелев В.Н., Голых Р.Н., Хмелев М.В., Шакура В.А., Шалунов А.В., Барсуков Р.В. // Южно-Сибирский научный вестник. 2017. № 3. С. 15. [Yuzhno-sibirskij nauchnyj vestnik, 2017, no. 3, p. 15].
9. Гаврилова Н.Н., Назаров В.В., Яровая О.В. Микроскопические методы определения размеров частиц дисперсных материалов. М.: ПХТУ им. Менделеева, 2012. 52 с.
10. Морозова А.В., Волкова Г.И. // Химия в интересах устойчивого развития. 2020. № 28. С. 508. <https://doi.org/10.15372/KhUR20202570/> [Chemistry for Sustainable Development, 2020, V. 28, p. 494. <https://doi.org/10.15372/CSD20202570>].



## Ultrasonic Treatment Conditions on the Properties of Emulsions

G. I. Volkova<sup>1,\*</sup>, E. Yu. Smirnova<sup>1,\*\*</sup>

<sup>1</sup>*FGBUN Institute of Petroleum Chemistry SB RAS (IPC SB RAS), 634055 Tomsk, Russia*

*\*e-mail: galivvol@yandex.ru*

*\*\*e-mail: smirnova.chemtsu@gmail.com*

The influence of ultrasonic treatment modes on microstructure and structural-rheological properties of emulsions of oils with distilled and formation water was investigated. Emulsions were treated in ultrasonic field (frequency 22 kHz, intensity 2, 6 and 18 W/cm<sup>2</sup>). The microstructure of emulsions was studied using an optical microscope AXIO LAB.A1 (Carl Zeiss, Germany). The dispersion analysis of emulsion micrographs was carried out and the influence of processing conditions, type of dispersed phase on the average particle size, dispersibility and position of the maximum of the size distribution of water droplets in the emulsion was revealed. Rheological parameters of emulsions before and after ultrasonic treatment were studied using HAAKE Viscotester iQ rotational viscometer (ThermoScientific, USA). For high-viscosity oil with high content of resinous-asphaltene components after ultrasonic treatment in pulse mode at field intensity of 6 W/cm<sup>2</sup> and 2 modes (5 cycles with 10 s of operation and 10 s of pause; 10 cycles with 5 s of operation and 5 s of pause) a decrease in the degree of dispersibility of water droplets was observed.

**Keywords:** oil, emulsion, ultrasonic treatment, dispersion analysis, viscosity, disperse system fracture energy