

**ВЛИЯНИЕ НИЗКОЧАСТОТНОГО АКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ И ПОЛИМЕРНОЙ ПРИСАДКИ НА СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ НЕФТИ****Ю.В. Лоскутова, Н.В. Юдина, В.А. Данекер**

Юлия Владимировна Лоскутова \*, Наталья Васильевна Юдина

Лаборатория реологии нефти, ИХН СО РАН, пр. Академический, 4, Томск, Российская Федерация, 634055  
E-mail: reoloil@ipc.tsc.ru\*, natal@ipc.tsc.ru

Валерий Аркадьевич Данекер

Кафедра электропривода и электрооборудования, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, пр. Ленина, 30, Томск, Российская Федерация, 634050  
E-mail: vad@tpu.ru

*Целью работы являлось исследование воздействия низкочастотного акустического поля и полимерной присадки на структурно-механические свойства проблемной высоkozастывающей нефти. Результаты получены методами ротационной вискозиметрии и определения температур фазовых переходов по изменению оптической плотности в инфракрасном свете, а также методом оптической микроскопии. Высокопарафинистая малосмолистая нефть (Томская область) подвергалась воздействию низкочастотного акустического поля ( $f = 50$  Гц, 1 и 3 мин обработки при температуре  $0$  °С) и химического реагента - полимерной присадки комплексного действия Д-210 (концентрация в нефти 0,05 %мас.), а также комплексной физико-химической обработке. Изучено влияние внешнего воздействия на вязкостно-температурные и энергетические характеристики, температуру фазовых переходов и структуру осадка нефти. Показано, что акустическое воздействие проблемной нефти при температуре, близкой к температуре застывания, приводит к увеличению вязкостно-температурных параметров. При комплексной обработке после ввода в обработанную нефть присадки происходит разрушение тиксотропной структуры, которое сопровождается резким снижением вязкости, температуры помутнения и температуры застывания, а также уменьшением значений энергетических параметров: энергии активации вязкого течения и внутренней энергии дисперсной системы. Для определения температуры спонтанной кристаллизации построены дифференциальные кривые зависимости коэффициента вязкости от температуры среды. Изучение микроструктуры выделенного из нефти осадка показало, что до акустической обработки в нефтяном осадке присутствуют мелкие линейные монокристаллические и сферические образования, после воздействия происходит их значительный рост. Структура осадка после комплексного воздействия представлена множеством крупных пластинчатых парафиновых кристаллитов.*

**Ключевые слова:** нефть, низкочастотная акустическая обработка, депрессорная присадка, вязкость, энергия активации вязкого течения, энергия разрушения структуры

## INFLUENCE OF LOW-FREQUENCY ACOUSTIC FIELD AND POLYMER ADDITIVE ON STRUCTURAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF OIL

Ju.V. Loskutova, N.V. Yudina, V.A. Daneker

Juliya V. Loskutova \*, Natalya V. Yudina

The Laboratory of Oil Rheology, Institute Of Petroleum Chemistry Siberian Branch Of The Russian Academy Of Sciences, Akademicheskoy ave., 4, Tomsk, 634055, Russia  
E-mail: reoloil@ipc.tsc.ru\*, natal@ipc.tsc.ru

Valeriy A. Daneker

Department of Electric Drive and Electrical Equipment, ENIN TPU, Tomsk Polytechnic University, Lenin ave., 30, Tomsk, 634050, Russia  
E-mail: vad@tpu.ru

*The goal of this work is to study the influence of low-frequency acoustic field and polymer additive on structural and mechanical properties of problematic quick-freezing oil. The results were acquired by methods of rotational viscosimetry and finding phase transition temperatures by using optical density of infrared light as well as optical microscopy method. Highly paraffinic low-resin oil (Tomsk region) was exposed to low-frequency acoustic field ( $f = 50$  Hz, 1 and 3 min of processing at  $0$  °C), a chemical reagent, the complex-action polymer additive D-210 (0.05% mass concentration in oil) and complex physical-chemical processing. This work studies external influence on viscosity, temperature and energy characteristics, phase transition temperature as well as structure of oil residue. It was shown that in the case of problematic oil at a temperature close to freezing point, the acoustic influence leads to increase of viscosity and temperature properties. After adding the additive to processed oil during the complex processing, the thixotropic structure is destroyed, which is followed by a sharp decrease in viscosity, cloud point and freezing point. There is also a decrease in energy parameters, such as activation energy of viscous flow and internal energy of a disperse system. To determine the temperature of spontaneous crystallization we plotted the differential curves of viscosity coefficient dependence on the temperature of the medium. Study of the microstructure of the oil residue had shown that it contains small linear single-crystal and spherical formations prior to acoustic processing. After processing, however, such formations display a significant growth. The structure of the residue after complex processing is represented by many large plate paraffin crystallites.*

**Key words:** oil, low-frequency acoustic processing, depressant additive, viscosity, activation energy of viscous flow, internal energy of a disperse system

### Для цитирования:

Лоскутова Ю.В., Юдина Н.В., Данекер В.А. Влияние низкочастотного акустического поля и полимерной присадки на структурно-механические параметры нефти. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2019. Т. 62. Вып. 1. С. 70–77

### For citation:

Loskutova Ju.V., Yudina N.V., Daneker V.A. Influence of low-frequency acoustic field and polymer additive on structural and mechanical properties of oil. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2019. V. 62. N 1. P. 70–77

### ВВЕДЕНИЕ

Разработка вопросов технологии освоения нефтяных месторождений, добычи и транспорта проблемных нефтей тесно связана со знаниями особенностей их структурно-механических или реологических свойств, изучение которых позволяет успешно воздействовать на нефтяные дисперсные системы (НДС) с целью улучшения текучести и стабильности при хранении [1-4].

Особенностью НДС является ее склонность к изменению степени дисперсности под влиянием внешних факторов (температуры, дав-

ления, химических добавок и физических полей), так как образующиеся коллоидно-дисперсные структуры, сформированные твердыми парафинами и асфальтено-смолистыми веществами, проявляют термодинамическую нестабильность. Варьируя интенсивность внешних воздействий, можно в широком диапазоне управлять свойствами НДС [5-6]. Одним из направлений регулирования вязкостно-температурных свойств НДС является применение комплексных физико-химических технологий с использованием химических реагентов и физических полей различной природы (магнитного, ультразвукового, электрического и других).

Низкочастотное акустическое (или вибрационное) воздействие на дисперсные системы является одним из самых эффективных механических воздействий, ускоряющих различные процессы. Оно увеличивает массо- и теплообмен, ускоряет химические реакции, снижает механическое сопротивление и вязкость [7, 8]. На практике воздействие низкочастотного акустического поля успешно применяется при откачке высокопарафинистых нефтей и нефтепродуктов из нефтехранилищ и цистерн, для уменьшения парафинизации трубопроводов, а также при разжижении, удалении и переработке донных отложений в резервуарах и нефтехранилищах, при приготовлении буровых и цементных растворов, полимерных составов и водонефтяных эмульсий [9].

Опытно-промышленные испытания показали, что, несмотря на высокую эффективность технологии на реальных объектах, необходимы дополнительные лабораторные исследования для выявления оптимальных параметров низкочастотного акустического воздействия [10]. Кроме того, использование обработки с добавлением в нефть многофункциональных полимерных присадок позволяет не только дополнительно снизить вязкость, но и значительно увеличить время релаксации свойств.

Цель работы – изучить влияние низкочастотного акустического воздействия и полимерной присадки комплексного действия на вязкостно-температурные свойства проблемной высокозастывающей нефти.

#### МЕТОДИКА И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследуемая нефть (месторождение Томской области) в нормальных условиях является легкой, маловязкой с высоким газовым фактором, однако, за счет повышенного содержания парафинов (твердых n-алканов) характеризуется высокой температурой застывания (минус 4,4 °С), в ней отсутствуют такие высокомолекулярные нефтяные компоненты, как асфальтены, и содержится порядка 3,5 % мас. смол.

Динамическую вязкость  $\eta$  образцов измеряли на реометре LVDVIII Ultra («Brookfield», США) с использованием термостатируемой цилиндрической измерительной системы типа «конус-конус» при фиксированной скорости сдвига 1 рад/с при понижении температуры от 20 °С до минус 15 °С со скоростью охлаждения 0,5 °С/мин. Контроль параметров (температура, скорость сдвига, частота измерений) осуществлялся с использованием специализированной компьютерной программы RheoCalc.

Низкочастотную акустическую обработку (НАО) проводили на лабораторной установке [11], колебательная система которой состоит из вибрирующего конфузора (активатора), упругих элементов и моторной части, погруженной в среду, которая является объектом воздействия. Энергия, необходимая для поддержания устойчивых возвратно-колебательных движений активатора, передается в систему электромагнитным полем. НАО осуществлялась на промышленной частоте  $f = 50$  Гц и виброускорениях до 100 g.

Воздействие осуществляется на частоте собственных колебаний механической системы, зависящей, в том числе, и от механических свойств среды: плотности, вязкости, статического напряжения сдвига. Высокая эффективность НАО определяется интенсивным комплексным воздействием физических полей на среду и резонансным режимом работы системы даже при относительно невысоких значениях частоты воздействия.

В ходе эксперимента исследуемые образцы нефти после предварительного охлаждения и термостатирования при 0 °С в течение 1-2 ч подвергались 1- и 3-минутной обработке. Необходимость обработки нефти при температуре, приближенной к температуре застывания, связана с ее малой вязкостью и высокой летучестью в нормальных условиях.

В качестве добавки использовали новую комплексную полимерную присадку российского производства К-210 (ДП) [12], обладающую депрессорными, диспергирующими и ингибирующими процесс осадкообразования свойствами. Концентрация присадки в нефти составила 0,05 % мас.

Значения температур помутнения ( $T_n$ ) и застывания ( $T_z$ ) нефти определяли на приборе ИНПН «Кристалл» марки SX-800 (Россия, Томск). Температуру максимальной скорости кристаллизации ( $T_k$ ) оценивали по максимуму дифференциальных кривых, полученных после математической обработки кривых «вязкость – температура» [13].

Микроструктуру осадков исследовали на микроскопе AxioLab.A1 (Carl Zeiss) в проходящем свете при увеличении в 400 раз.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Любой вид физического воздействия на НДС сопровождается разрушением и/или образованием парафиновых кристаллитов и асфальтено-смолистых компонентов (АСК) и, как следствие, значительным изменением структурно-реологических свойств [14-16]. При НАО основные процессы структурообразования протекают в надмолеку-

лярной структуре НДС. При этом важную роль играет соотношение компонентов дисперсной фазы (парафинов и АСК) и дисперсионной среды, состоящей из жидкофазных компонентов нефти (масла, низшие углеводороды).

Для исследуемой нефти, характеризующейся высоким содержанием парафинов и малым количеством смол (рис. 1, кр. 1), в начальный период обработки (1 мин НАО – кр. 2), за счет разрыва слабых межмолекулярных (дисперсионных) связей, происходит разрушение кристаллической структуры парафинов и, как следствие, их частичное растворение в дисперсионной среде. Это вызывает значительное снижение вязкости в 3-5 раз в области отрицательных температур.

С увеличением времени обработки до 3 мин (рис. 1, кр. 3) существенно повышается вязкость во всем температурном диапазоне, что может быть связано как с появлением инерционной (ближней) коагуляции, так и с «эффектом вибрационного упрочнения структуры» [9, 17].

Однако при совместном использовании НАО и присадки предел текучести  $T_{пт}$  сдвигается в низкотемпературную область с  $-4,7$  до  $-13,9$  °С, а вязкость нефти, например, при температуре  $-3$  °С понижается в 85 раз (рис. 1, кр. 4, табл. 1).

Таблица 1

Физико-химические характеристики нефти  
Table 1. Physical and chemical oil properties

№ п/п	$\eta$ , Па·с	Температура, °С			
		$T_{пт}$	$T_n$	$T_k$	$T_z$
№1	11,0	-4,7	14,8	-4,2	-4,4
№2	2,1	-14,1	16,1	-13,9	-3,6
№3	2,8	-9,2	16,3	-9,0	-3,3
№4	0,13	-13,9	12,8	> -15,0	-24,6

Дифференциальные кривые зависимости температурного коэффициента вязкости  $d\eta/dT$  от температуры среды исследуемых образцов представлены несколькими линейными участками, которые существенно отличаются по скорости изменения вязкости с понижением температуры, и имеют один максимум, соответствующий температуре спонтанной кристаллизации  $T_k$  (рис. 1). Из табл. 1 видно, что НАО снижает  $T_k$  на 9,7 и 4,8 °С, соответственно (образцы №2 и №3).

Для исходного образца нефти до 0 °С происходит незначительное изменение коэффициента  $d\eta/dT$ , далее наблюдается его резкий рост (рис. 1, кр. 1). НАО продолжительностью в 1-3 мин сдвигает максимум, соответствующий температуре  $T_k$ , в область более низких температур (кр. 2, 3). После 1 мин НАО и последующим вводом в нефть

ДП дифференциальные кривые имеют вид протяженных линейных участков, характеризующихся низкими значениями  $d\eta/dT$  со слабовыраженными максимумами (4).

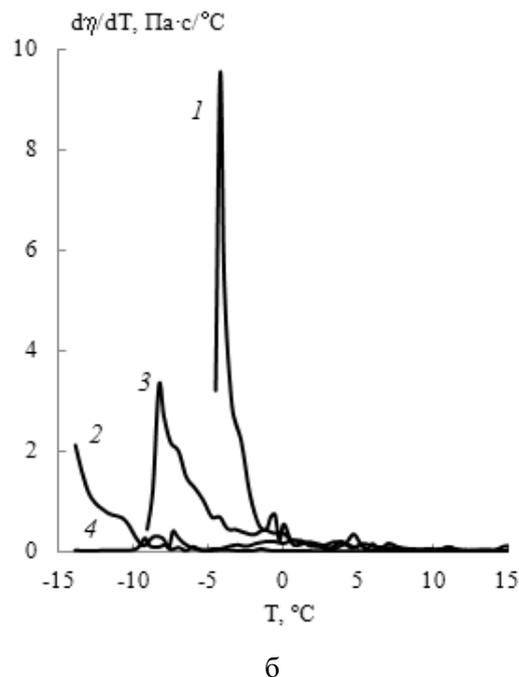
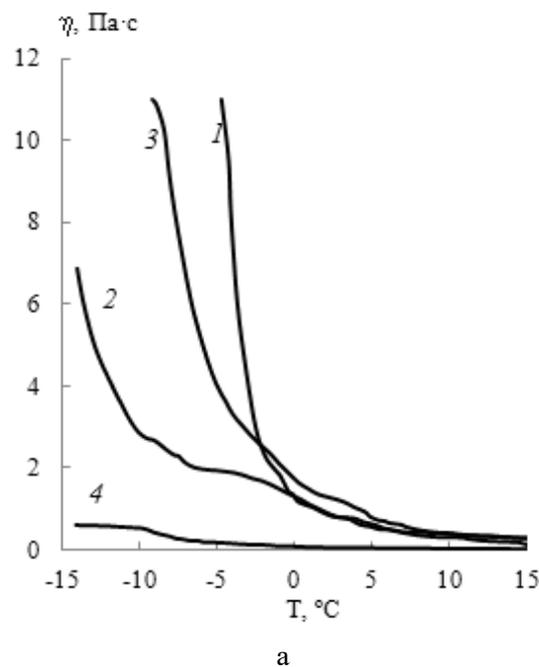


Рис. 1. Вязкостно-температурные кривые  $\eta(T)$  (а) и дифференциальные зависимости  $d\eta/dT$  (б) нефти после различного вида воздействия: 1 – исходная, 2 – 1 мин НАО, 3 – 3 мин НАО, 4 – 1 мин НАО с ДП

Fig. 1. Viscosity and temperature curves  $\eta(T)$  (a) and differential dependences  $d\eta/dT$  (b) of oil after different processing types: 1 – default, 2 – 1 min LFAP, 3 – 3 min LFAP, 4 – 1 min LFAP with depressant additive

Акустическое воздействие приводит к незначительному увеличению как температуры помутнения  $T_m$ , так и температуры застывания  $T_z$  нефти, возможно, за счет потери при НАО части легких углеводородов (табл. 1). Введение после НАО в обработанную нефть 0,05 % мас. ДП, напротив, понижает  $T_m$  и  $T_z$  на 2 и 20,2 °С соответственно. Депрессорный эффект наиболее сильно проявляется в области температур, приближенных к температуре застывания нефти.

Для исследования особенностей процессов структурообразования в НДС было использовано уравнение Френкеля-Эйринга (1):

$$\eta = A \cdot \exp^{-E_{вт}^a/RT}, \quad (1)$$

где  $E_{вт}^a$  – энергия активации вязкого течения, кДж/моль;  $A$  – предэкспоненциальный коэффициент;  $R$  – газовая постоянная,  $R = 8.314$  кДж/моль;  $T$  – абсолютная температура, К [18].

Для расчета  $E_{вт}^a$  строилась логарифмическая зависимость динамической вязкости нефти от температуры  $\ln \eta(1/T)$  в диапазоне от 20 до – 15 °С (рис. 2). Величина  $E_{вт}^a$ , которая определяется по тангенсу угла наклона касательной к криволинейной зависимости, характеризует прочность связей в агрегатах в каждом структурном состоянии.

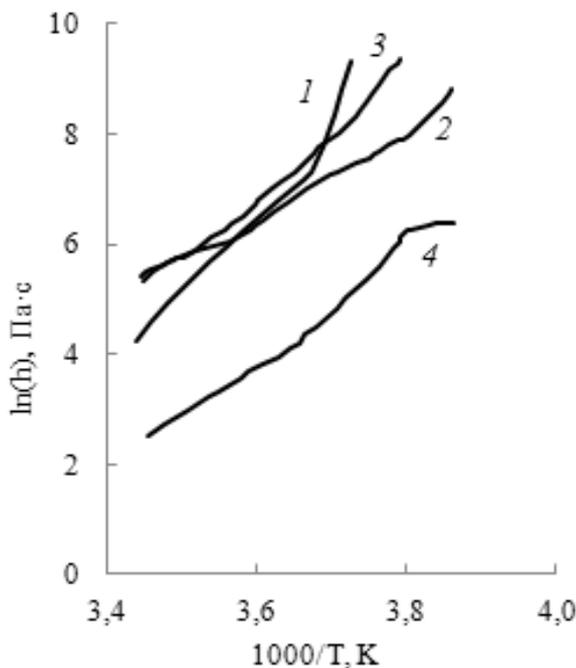


Рис. 2. Полулогарифмическая зависимость вязкости  $\eta$  от температуры  $T$  (К) нефти после различного вида воздействия: 1 – исходная, 2 – 1 мин НАО, 3 – 3 мин НАО, 4 – 1 мин НАО с ДП  
Fig. 2. Semi-logarithmic dependence of viscosity  $\eta$  on oil temperature  $T$  (K) after different processing types: 1 – default, 2 – 1 min LFAP, 3 – 3 min LFAP, 4 – 1 min LFAP with depressant additive

Для исходной нефти график имеет два участка, отвечающие определенным типам структурообразования и разделенные точкой перегиба, соответствующей температуре фазового перехода ( $T_{фп}$ ), при которой происходит разрушение кристаллической структуры парафиновых углеводородов (рис. 2, кр. 1, табл. 2). Изменение величины  $E_{вт}^a$  связано со скачкообразным изменением степени ассоциации молекул в нефтяной системе и свидетельствует о произошедших фазовых переходах.

Таблица 2

Энергетические характеристики нефти  
Table 2. Energy properties of oil

№ п/п	$E_{вт}^a$ , кДж·моль <sup>-1</sup>	$T_{фп}$ , °С	$W_u$ , кДж
1	54,8/140,9	0,1	1,05
2	34,5	нет	0,78
3	49,5	нет	0,70
4	45,6/9,5	-10,0	0,01

После НАО вид вязкостно-температурных зависимостей представлен лишь одной линейной функцией без точки перегиба (рис. 2, кр. 2, 3). После комплексной обработки на кривой сохраняются 2 участка, но при этом величины  $E_{вт}^a$  существенно ниже, чем до обработки, и  $T_{фп}$  сдвигается на 10 °С в область отрицательных температур (4).

Для определения суммарного расхода энергии  $W_u$ , необходимого для разрушения структуры высокопарафинистых нефтей за счет сдвиговой скорости при трубопроводном транспорте, рассчитывали энергетические параметры гидромеханического разрушения надмолекулярной структуры нефти по методике, описанной в [10]. Реологические зависимости напряжения сдвига от скорости сдвига  $\tau(\dot{\gamma})$  для прямого и обратного хода снятия кривых течения нефти, термостатированной при 0 °С, через фиксированные промежутки времени (20 с) при скоростях сдвига от 0,34 до 85 с<sup>-1</sup>, характерных при перекачке по трубопроводу в реальных условиях, представлены на рис. 3.

Уравнение внутренней энергии системы записывается в виде (2):

$$dW_u = dQ + dA + dZ, \quad (2)$$

где  $W_u$  – внутренняя энергия системы;  $Q$  – тепло;  $A$  – работа;  $Z$  – энергия переноса массы.

Площадь петли гистерезиса обработанной акустическими полями в течение 1 мин нефти близка к площади петли исходной нефти, а после 3 мин НАО, напротив, значительно возрастает (рис. 3, кр. 1, 2, 3). После обработки охлажденной нефти с последующим вводом ДП кривые прямого и обратного хода сближаются, скорости разру-

шения и восстановления тиксотропной структуры выравниваются, а значения энергии  $Wu$  при этом снижаются в 20 раз (табл. 2).

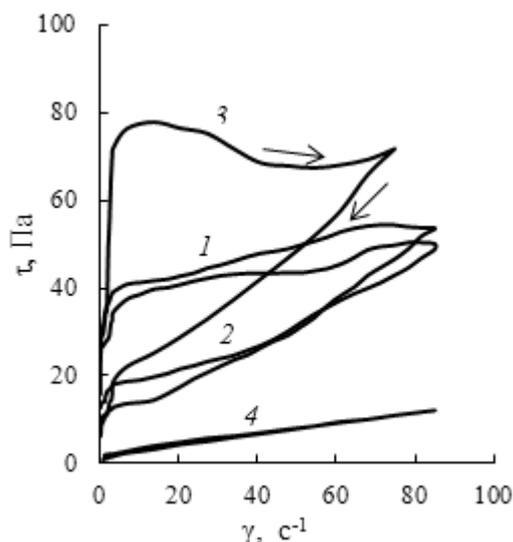


Рис. 3. Реограмма прямого (→) и обратного (←) хода зависимости напряжения сдвига  $\tau$  (Па) от скорости сдвига  $\gamma$  ( $s^{-1}$ ) нефти после различного вида воздействия: 1 – исходная, 2 – 1 мин НАО, 3 – 3 мин НАО, 4 – 1 мин НАО с ДП

Fig. 3. Rheogram of forward (→) and reverse (←) motion of shear stress  $\tau$  (Pa) dependence on shear rate  $\gamma$  ( $s^{-1}$ ) for oil after different processing types: 1 – default, 2 – 1 min LFAP, 3 – 3 min LFAP, 4 – 1 min LFAP with depressant additive

Сложный состав нефти, а также использование комплексной обработки, сочетающей акустическое воздействие, мощное омагничивание и интенсивное перемешивание с высокими сдвиговыми скоростями и добавку химического реагента не позволяют четко сформулировать единый подход к описанию механизма действия НАО на НДС. Известно, что смолы и асфальтены препятствуют образованию объемной структурной сетки, и кристаллы парафина остаются в подвижном состоянии в интермицеллярной форме [19]. В данном случае смолы и асфальтены выступают в роли ПАВ и выполняют функции структурно-механического барьера на поверхности частиц, препятствуют их коагуляции, увеличивая глубину и скорость разрушения структуры дисперсной фазы [6, 20].

Для изучения микроструктуры осадков, выделенных из нефти после обработки, был проведен анализ микрофотографий (рис. 4).

В структуре исходного осадка присутствуют как мелкие линейные монокристаллические, так и сферические образования парафинов (5-10 мкм), рост которых наблюдается с течением времени. После НАО в осадок попадают крупные линейные парафиновые монокристаллические об-

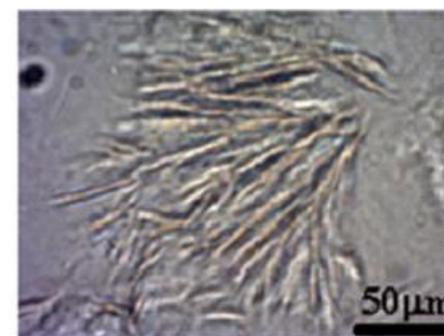
разования (10-30 мкм). После НАО и ввода присадки осадок представлен множеством крупных напоминающих коралловую колонию пластинчатых кристаллитов. Представленные 3D-структуры образованы концентрирующимися в осадке высокомолекулярными *n*-алканами.



ИСХ



НАО



НАО+ДП

Рис. 4. Микроструктура осадков нефти после различного вида воздействия

Fig. 4. Microstructure of oil residue after different processing types

#### ВЫВОД

Обработка низкочастотным акустическим полем нефти с повышенным содержанием парафиновых углеводородов при температуре, близкой к температуре застывания, приводит к увеличению температур, характеризующих фазовое состояние:

температуры фазового перехода, температуры помутнения и застывания.

Воздействие на нефть акустическим полем с последующим вводом депрессорной присадки приводит к практически полному разрушению тиксотропной структуры, что сопровождается

резким снижением вязкостно-температурных характеристик и уменьшением энергетических параметров.

*Работа выполнена в рамках Проекта по выполнению фундаментальных научных исследований (№ 0370-2016-0005).*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Huang Z., Zheng S., Fogler H.S.** Wax Deposition: Experimental Characterizations, Theoretical Modeling, and Field Practices. CRC Press. Taylor&Francis Group. 2015. 184 p.
2. Chemicals for the Oil and Gas Industry. Second Edition by Malcolm A. Kelland. CRC Press. Taylor&Francis Group. 2014. 412 p.
3. **Speight J.G.** The Chemistry and Technology of Petroleum. CRC Press. Taylor&Francis Group. 2010. 915 p.
4. **Волкова Г.И., Лоскутова Ю.В., Прозорова И.В., Березина Е.М.** Подготовка и транспорт проблемных нефтей (научно-практические аспекты). Томск: Издательский дом ТГУ. 2015. 136 с.
5. **Lopes-da-Silva J.A., Coutinho João A.P.** Analysis of the Isothermal Structure Development in Waxy Crude Oils under Quiescent Conditions. *Energy & Fuels*. 2007. V. 21. N 6. P. 3612-3617. DOI:10.1021/ef700357v.
6. **Сафиева Р.З.** Химия нефти и газа. Нефтяные дисперсные системы: состав и свойства (часть 1). М.: РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина. 2004. 112 с.
7. **Ткачев О.А., Тугунов П.И.** Сокращение потерь нефти при транспорте и хранении. М.: Недра. 1988. 118 с.
8. **Лоскутова Ю.В., Прозорова И.В., Юдина Н.В., Рикконен С.В.** Изменение реологических свойств нефтяных дисперсных систем при вибрационной обработке. *Коллоид. журн.* 2005. Т. 67. № 5. С. 663-667. DOI:10.1007/s10595-005-0138-9.
9. **Лоскутова Ю.В., Прозорова И.В., Юдина Н.В.** Улучшение структурно-реологических свойств высокопарафинистой нефти с помощью химических реагентов и вибрационной обработки. *Химия и технология топлив и масел*. 2011. Т. 47. № 5. С. 21-23. DOI:10.1007/s10553-011-0308-x.
10. Автоматизация и информационное обеспечение технологических процессов в нефтяной промышленности. Сб. статей. Под ред. А.К. Хорькова. Томск: Из-во ТГУ. 2002. Т. 2. 408 с.
11. **Гузев С.П., Данекер В.А., Рикконен С.В., Теплов А.И., Хорьков А.К.** Патент РФ № 2203862. 2003.
12. **Дементьев А.В., Меджибовский А.С., Мойкин А.А., Казанцев О.А.** Патент РФ № 2541680С1. 2015.
13. **Волкова Г.И., Ануфриев Р.В., Юдина Н.В., Чайковская О.Н.** Исследование депрессорной способности полиалкилакрилатных присадок после ультразвукового воздействия. *Изв. вузов. Физика*. 2016. Т. 59. № 8. С. 148-152. DOI:10.1007/s11182-016-0904-7.
14. **Loskutova Yu.V.** Asphaltenes: Characterization, Properties and Applications. Series: Chemical Engineering Methods and Technology. In: Jeremy A. Duncan (Ed.). USA: Nova Science Publishers, Inc. 2010. P. 121-144.
15. **Волкова Г.И., Прозорова И.В., Лоскутова Ю.В., Юдина Н.В., Березина Е.М., Ануфриев Р.В.** Влияние полимерной присадки на реологические и энергетические параметры высокопарафинистых нефтей. *Изв. вузов. Физика*. 2011. Т. 54. № 9/2. С. 69-73.

#### REFERENCES

1. **Huang Z., Zheng S., Fogler H.S.** Wax Deposition: Experimental Characterizations, Theoretical Modeling, and Field Practices. CRC Press. Taylor&Francis Group. 2015. 184 p.
2. Chemicals for the Oil and Gas Industry. Second Edition by Malcolm A. Kelland. CRC Press. Taylor&Francis Group. 2014. 412 p.
3. **Speight J.G.** The Chemistry and Technology of Petroleum. CRC Press. Taylor&Francis Group. 2010. 915 p.
4. **Volkova G.I., Loskutova Yu.V., Prozorova I.V., Berezhina E.M.** Preparation and transport of problematic oils (scientific and practical aspects). Tomsk: Publishing House TGU, 2015. 136 p. (in Russian).
5. **Lopes-da-Silva J.A., Coutinho João A.P.** Analysis of the Isothermal Structure Development in Waxy Crude Oils under Quiescent Conditions. *Energy & Fuels*. 2007. V. 21. N 6. P. 3612-3617. DOI:10.1021/ef700357v.
6. **Safieva R.Z.** Chemistry of oil and gas. Petroleum diesel systems: composition and properties (part 1). М.: Russian state University of oil and gas. I.M. Gubkin. 2004. 112 p. (in Russian).
7. **Tkachev O.A., Tugunov P.I.** Reduction of oil losses during transport and storage. М.: Nedra. 1988. 118 p. (in Russian).
8. **Loskutova Yu.V., Prozorova I.V., Yudina N.V., Rikkonen S.V.** Change in the Rheological Properties of Oil Disperse Systems upon a Vibrational Treatment. *Colloid J.* 2005. V. 67. N 5. P. 602-605. DOI:10.1007/s10595-005-0138-9.
9. **Loskutova Yu.V., Prozorova I.V., Yudina N.V.** Improving the structural-rheological properties of high-paraffin crude oil using chemical reagents and vibrational treatment. *Chem. Technol. Fuel. Oil.* 2011. V. 47. N 5. P. 358-361. DOI:10.1007/s10553-011-0308-x.
10. Automation and information support of technological processes in oil industry. Digest of articles. Under Ed. A.K. Khorkov. Tomsk: TGU. 2002. V. 2. 408 p. (in Russian).
11. **Guzeev S.P., Daneker V.A., Rikkonen S.V., Teplov A.I., Hor'kov A.K.** RF Patent N 2203862. 2003. (in Russian).
12. **Dement'ev AV., Medzhibovskij A.S., Mojkin A.A., Kazancev O.A.** RF Patent N 2541680 C1. 2015. (in Russian).
13. **Volkova G.I., Anufriev R.V., Yudina N.V., Chaikovskaya O.N.** The depressor ability of polyalkyl acrylate additives after ultrasonic treatment. *Russ. Phys. J.* 2016. V. 59. N 8. P. 132-136. DOI: 10.1007/s.11182-016-0904-7.
14. **Loskutova Yu.V.** Asphaltenes: Characterization, Properties and Applications. Series: Chemical Engineering Methods and Technology. In: Jeremy A. Duncan (Ed.). USA: Nova Science Publishers, Inc. 2010. P. 121-144.

16. Мальцева Е.В., Богословский А.В., Юдина Н.В. Применение низкочастотного вибрационного метода для определения начала кристаллизации парафинов в нефтяных дисперсных системах. *Журн. приклад. химии*. 2012. Т. 85. № 5. С. 750-754.
17. **Uriev N.B.** Technology of Dispersed Systems and Materials: Physicochemical Dynamics of Structure Formation and Rheology. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. 2017. 181 p.
18. **Ратов А.Н.** Механизмы структурообразования и аномалии реологических свойств высоковязких нефтей и битумов. *Росс. хим. журн.* 1995. Т. 39. № 5. С. 106-113.
19. **Beshagina E.V., Yudina N.V., Loskutova Yu.V., Krutey A.A.** Paraffin Blockage Specificsin Model Pe-troliferous Systems. *Procedia Chem.* 2014. V. 10. P. 229-235. DOI: 10.1016/j.proche.2014.10.039.
20. **Tao R., Xu X.** Reducing the Viscosity of Crude Oil by Pulsed Electric or Magnetic Field. *Energy&Fuels*. 2006. V. 20. N 5. P. 2046-2051. DOI:10.1021/ef060072x.
15. **Volkova G.I., Prozorova I.V., Loskutova Yu.V., Yudina N.V., Berezina E.M., Anufriev R.V.** Influence of polymeric additive on rheological and energy parameters of high paraffinic oils. *Izv. VUZov.Fizika*. 2011. V. 54. N 9/2. P. 69-73 (in Russian).
16. **Mal'tseva E.V., Bogoslovskii A.V., Yudina N.V.** Application of the low-frequency vibratory method for determining the paraffin crystallization onset in dispersed petroleum systems. *Russ. J. Appl. Chem.* 2012. V. 85. N 5. P. 751-754.
17. **Uriev N.B.** Technology of Dispersed Systems and Materials: Physicochemical Dynamics of Structure Formation and Rheology. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. 2017. 181 p.
18. **Ratov A.N.** Mechanisms of structure formation and anomalies of rheological properties of high-viscosity oils and bitumen. *Russ. Chem. J.* 1995. V. 39. N 5. P. 106-113 (in Russian).
19. **Beshagina E.V., Yudina N.V., Loskutova Yu.V., Krutey A.A.** Paraffin Blockage Specificsin Model Pe-troliferous Systems. *Procedia Chem.* 2014. V. 10. P. 229-235. DOI: 10.1016/j.proche.2014.10.039.
20. **Tao R., Xu X.** Reducing the Viscosity of Crude Oil by Pulsed Electric or Magnetic Field. *Energy&Fuels*. 2006. V. 20. N 5. P. 2046-2051. DOI:10.1021/ef060072x.

*Поступила в редакцию 12.03.2018  
Принята к опубликованию 22.11.2018*

*Received 12.03.2018  
Accepted 22.11.2018*