

УДК 665.6/.7

DOI: 10.15372/ChUR2023445

EDN: UHGXR

Влияние магнитного поля на структурно-реологические характеристики смолистых нефтей и их эмульсий

Е. В. КУХАРЕВА, Ю. В. ЛОСКУТОВА, Н. В. ЮДИНА

Институт химии нефти СО РАН,
Томск (Россия)

E-mail: kukhareva3000@mail.ru

(Поступила 11.04.22; после доработки 26.10.22)

Аннотация

В связи с выработкой запасов легких нефтей в эксплуатацию все чаще вводятся месторождения нефтей с повышенным содержанием парафиновых углеводородов и смолисто-асфальтеновых компонентов, характеризующихся высокими значениями плотности, вязкости и температуры застывания. Их добыча сопровождается образованием асфальтосмолопарафиновых отложений на стенках технологического оборудования и, как следствие, приводит к дополнительным материальным затратам, связанным с повышенным износом оборудования. Изучено влияние магнитного поля на структурно-реологические и энергетические характеристики двух нефтей различного состава и их эмульсий (10 мас. % воды). После магнитной обработки происходит изменение компонентного состава исследуемых нефтесодержащих систем. Воздействие магнитного поля на малопарафинистую смолистую нефть сопровождается ростом вязкости во всем температурном диапазоне. После обработки высокопарафинистой смолистой нефти изменения вязкости не столь значительны, однако наблюдается снижение температуры застывания.

Ключевые слова: нефть, магнитная обработка, магнитное поле, структурно-реологические свойства, нефтесодержащие системы

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день в мире сохраняется тенденция увеличения добычи нефтей, обладающих высокой вязкостью при обычных температурах или содержащих большое количество парафина и вследствие этого застывающих при повышенных температурах. В процессе добычи, транспорта, хранения и переработки таких нефтей с понижением температуры окружающей среды значительно ухудшаются их вязкостно-температурные характеристики, на стенках технологического оборудования образуются асфальтосмолопарафиновые отложения, что приводит к нарушению технологических процессов и, как

следствие, к дополнительным энергетическим и материальным затратам [1, 2].

Для решения данных проблем обычно используются различные физико-химические методы воздействия: перекачка с разбавителями; гидротранспорт высоковязких нефтей; перекачка термообработанных нефтей; обработка нефтей присадками, предотвращающими или ингибирующими процесс образования асфальтосмолопарафиновых отложений; обработка добываемой продукции различными типами физических полей (электрическим, электромагнитным, магнитным, микроволновым, акустическим и т. д.) [3–5].

Малоэнергетические технологии (акустические, вибрационные, магнитные и др.), с помо-

щью которых можно без заметных внешних энергетических затрат или с использованием внутренних резервов перестраивать структуру нефти и нефтесодержащих систем (НС) – водо-нефтяных эмульсий, мазутов, нефтешламов, кубовых остатков – являются наиболее перспективными в виду их эффективности, доступности и экономичности [6–9]. Преимущество магнитной обработки (МО) перед многочисленными способами улучшения структурно-механических свойств высоковязких нефтей состоит в ее технической и экологической безопасности, высоком коэффициенте полезного действия и низкой энергозатратности. Обработка магнитным полем позволяет за короткий промежуток времени достичь значительного уровня разрушения структуры нефтяных агрегатов, образованных смолисто-асфальтеновыми компонентами и кристаллическими парафинами, и поддерживать этот уровень в течение времени, необходимого для осуществления массообменных процессов [10, 11].

В настоящее время имеется недостаток теоретических знаний в области МО по причине сложности объяснения протекания структурных и энергетических превращений в веществах различного строения на микро- и макроуровне. Существуют различные гипотезы, объясняющие механизм действия МО на нефтяные дисперсные системы: коллоидные, в основе которых лежит действие магнитных полей на коллоидные частицы, чаще пара-, диа- или ферромагнитные (смолы, асфальтены и парафины) [12, 13]; ионные, в которых основная роль возлагается на ионы, находящиеся в водной фазе (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , HCO_3^- и др.); водные, обосновывающие действие магнитных полей непосредственно на воду [14–16].

Установлено, что под действием магнитного поля на водонефтяную дисперсную систему, содержащую микрочастицы ферромагнитных соединений железа, парафины, асфальтены и соли, которые являются основными стабилизаторами бронирующих оболочек стойких водонефтяных эмульсий, происходит поляризация капель водной фазы и их взаимное притяжение. Это приводит к значительному ускорению коагуляции и коалесценции капель и, как следствие, к разделению нефтяной и водной фаз [17].

Известно, что каждое месторождение нефти уникально по компонентному составу и физико-химическим свойствам. Цель настоящей работы – изучение влияния магнитного поля на структурно-механические и вязкостно-темпе-

ратурные характеристики двух нефтей различного состава и 10 % эмульсий на их основе.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве объектов исследования выбраны нефти Столбового (СТ) и Восточно-Каменного (ВК) месторождений и эмульсии (10 мас. % воды) на их основе. В табл. 1. представлены основные физико-химические характеристики нефтей: ρ_{20} – плотность при 20 °С; T_z – температура застывания; содержание парафиновых углеводородов (ПУ), нефтяных смол (С) и асфальтенов (А). Нефть СТ характеризуется как малопарафинистая ($\text{ПУ} < 6$ мас. %), смолистая ($(\text{С} + \text{А}) > 8$ мас. %), с низкой температурой застывания, а нефть ВК – высокопарафинистая, смолистая, с высокой температурой застывания.

Для приготовления эмульсий взвешенные массы нефти (90 мас. %) и дистиллированной воды (10 мас. %) перемешивали в течение 10 мин при 3000 об/мин на лабораторной мешалке при комнатной температуре 22 °С.

Обработку магнитным полем исследуемых нефтей осуществляли с помощью магнитного активатора проточного типа серии “МАУТ” (ООО ПКФ “Экси-Кей”, Россия), созданного на основе постоянных магнитов Ne-Fe-B (индукция 0.3–0.4 Тл). Устройство “МАУТ” позволяет получить несколько зон с чередующимися направлениями радиального магнитного поля. Влияние знакопеременного магнитного поля на реологические свойства нефтей изучали при комнатной температуре в проточном режиме течения, время пребывания нефти в рабочей зоне “МАУТ” составляло порядка 2–4 с.

Определение динамической вязкости и температуры застывания нефти до и после МО проводили на приборе ИНПН “Кристалл SX-800” (ИХН СО РАН, Россия, № 31553-06 Госреестр РФ) с погрешностью измерения ± 2 °С.

ТАБЛИЦА 1

Физико-химические характеристики исследуемых нефтей

Образец нефти	ρ_{20} , кг/м ³	T_z , °С	Содержание нефти, мас. %			
			ПУ	С	А	ПУ/САК
СТ	872	–40.3	0.4	8.6	2.6	0.04
ВК	867	–3.6	6.7	7.1	1.6	0.8

Примечание. СТ, ВК – образцы нефти Столбового и Восточно-Каменного месторождений соответственно; ПУ – парафиновые углеводороды; С – смолы; А – асфальтены; САК – смолисто-асфальтеновые компоненты.

Содержание асфальтенов в НС определяли при помощи “холодного” способа Гольде, а смолистых веществ – хроматографическим методом (колоночно-адсорбционным) по ГОСТ 11851-2018.

Для исследования различий в составе асфальтенов, бензольных и спиртобензольных смол исходных и обработанных образцов использовали метод ИК-спектроскопии. Инфракрасные спектры регистрировали с помощью FTIR-спектрометра Nicolet 5700 (Thermo Electron Corp., США) в области $410\text{--}4000\text{ см}^{-1}$ (длины волн от 2,5 до 20 мкм). Обработку спектров и определение оптической плотности проводили с помощью программного обеспечения OMNIC 7.2 Thermo Nicolet Corp. Исследуемые образцы асфальтенов анализировали в таблетках KBr: навеску твердого вещества тщательно смешивали со спектрально чистым бромидом и прессовали смесь, а образцы смол – в виде тонких пленок жидкости, зажатых между пластинками из KBr.

Для изучения процессов структурообразования в НС по уравнению Френкеля–Эйринга рассчитывали энергию активации вязкого течения (E_a), характеризующую прочность связей в агрегатах в каждом структурном состоянии:

$$\eta = A \exp^{E_a/RT} \quad (1)$$

где η – динамическая вязкость, мПа · с; A – предэкспоненциальный коэффициент, включающий в скрытом виде зависимость вязкости от других параметров структуры, в частности молекулярной массы; E_a – энергия активации процесса вязкого течения (энергетический барьер процесса флуктуационного перехода), кДж/моль; R – универсальная газовая постоянная; T – абсолютная температура, К.

Для определения E_a по уравнению (1) строилась полулогарифмическая зависимость динамической вязкости нефти от обратной температуры $-\ln\eta(1/T)$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Изучение вязкостно-температурного поведения исходных и магнитообработанных нефтей, а также их эмульсий проводили при охлаждении до $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ для малопарафинистой смолистой нефти СТ и до $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ для высокопарафинистой смолистой нефти ВК (рис. 1). Если в температурном интервале от 0 до $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ вязкость нефти СТ плавно возрастает, то при дальнейшем понижении температуры наблюдается ее резкий скачок. Характер изменения вязкости обработанной нефти с понижением температуры во многом похож на поведение необработанной нефти (см. рис. 1, а). На вязкость нефти ВК в низкотемпературной области магнитное воздействие не оказывает заметного влияния (см. рис. 1, б).

Известно, что при добавлении в нефть небольшого количества воды происходит образование новой высоковязкой НС за счет создания более плотной упаковки, в которой мелкие водные глобулы являются многочисленными, не связанными между собой центрами формирования дисперсной фазы [18, 19]. Обработка такой системы физическими полями приводит к ее дальнейшему упорядочению и уплотнению. Поэтому обработанные магнитным полем эмульсии нефтей СТ и ВК также характеризуются более

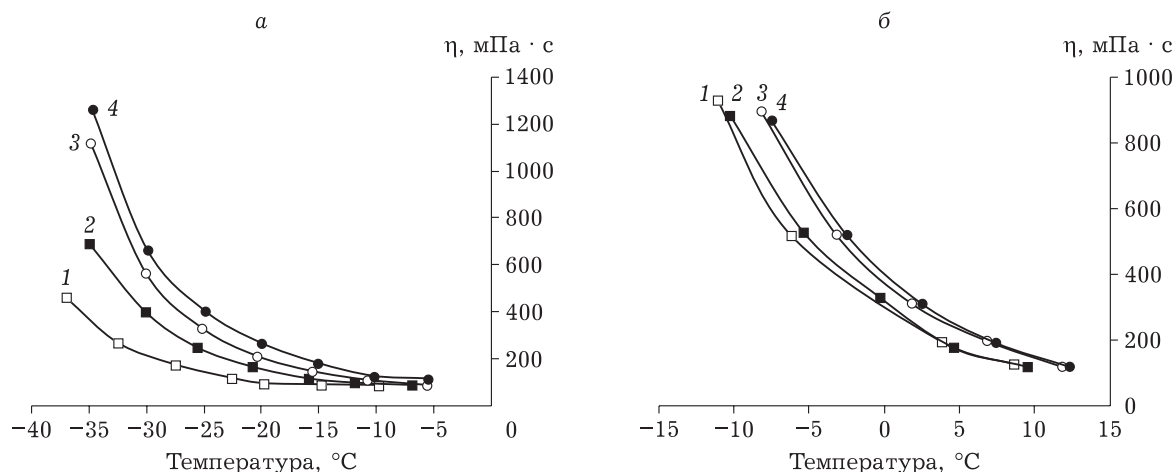


Рис. 1. Зависимости вязкости (η) от температуры нефтей и 10 мас. % эмульсий СТ (а) и ВК (б) до и после МО: 1 – исходная нефть; 2 – обработанная нефть; 3 – исходная эмульсия; 4 – обработанная эмульсия. Усл. обозн. здесь и на рис. 2–4: СТ и ВК – образцы нефти Столбового и Восточно-Каменного месторождений соответственно; МО – магнитная обработка.

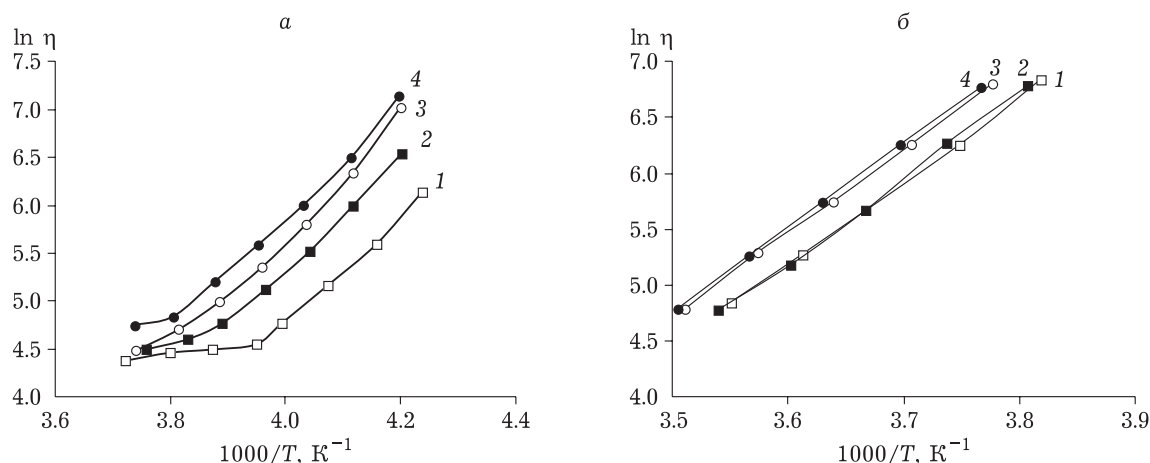


Рис. 2. Полулогарифмическая зависимость вязкости (η) от обратной температуры (T) в аррениусовских координатах для нефти и 10 % мас. эмульсии СТ (а) и ВК (б) до и после МО: 1 – исходная нефть; 2 – обработанная нефть; 3 – исходная эмульсия; 4 – обработанная эмульсия. Обозн. см. рис. 1.

высокими значениями вязкости, чем необработанные. Изменение коллоидно-химических свойств смолистых и высокопарафинистых нефтей при воздействии физическими полями может быть связано с процессами структурообразования, протекающими в структуре НС в основном за счет разрыва слабых дисперсионных связей [20, 21].

Для характеристики прочности образующихся агрегатов рассчитывали значения энергии активации вязкого течения E_a , величина которой определяется по тангенсу угла наклона касательной к кривой зависимости (рис. 2). Для исходных НС график может представлять собой два участка, отвечающих определенным типам структурообразования и разделенных точкой перегиба (см. рис. 2, а). Эта точка соответствует температуре фазового перехода ($T_{\text{фп}}$), при которой происходит разрушение существующей в данных условиях нефтяной структуры [22]. Такой вид кривых характерен для нефти СТ и нефтяной эмульсии до и после МО. Значения E_a до и после $T_{\text{фп}}$ при этом значительно различаются между собой. Наибольший рост величины E_a как для магнитообработанной нефти, так и для эмульсии наблюдается в температурной области до точки $T_{\text{фп}}$. В низкотемпературной области эти изменения менее значительны. После МО точка фазового перехода сдвигается в высокотемпературную область на 4 °С для нефти и на 10 °С для эмульсии.

Вид вязкостно-температурных зависимостей нефти ВК и эмульсии до и после МО представлен одной линейной функцией без точки перегиба, что соответствует плавному изменению вязкости с понижением температуры без точки

фазовых переходов (см. рис. 2, б). Линейные зависимости отличаются только углом наклона, что выражается в различных значениях E_a (табл. 2).

Для изучения процессов структурообразования, протекающих в НС, исследовали влияние МО на компонентный состав нефтей СТ и ВК и эмульсий на их основе. Изменение группового состава образцов в результате МО представлено на рис. 3. Содержание асфальтенов в исходной нефти и эмульсии СТ близко между собой (см. рис. 3, а). После обработки магнитным полем количество асфальтенов в нефти и эмульсии возрастает в 1.6 и 1.2 раза соответственно, содержание бензольных смол уменьшается как в нефти, так и в эмульсии на 28 и 44 мас. % соответственно. После МО количество полярных компонентов фракции спиртобензольных смол в нефти снижается на 18 мас. %, а в эмульсии, напротив, возрастает на 63 мас. %. Возможно, это связано с увеличением реакционной активности и/или полярности в магнитном поле бензольных смол, что приводит к образованию новых высокопрочных агрегатов со спиртобензольными

ТАБЛИЦА 2

Значения энергии активации вязкого течения (E_a) и температуры фазового перехода ($T_{\text{фп}}$) нефтей и эмульсий до и после магнитной обработки (МО)

Образец	E_a (E_1/E_2), кДж/моль		$T_{\text{фп}}$, °С	
	Исходно	МО	Исходно	МО
Нефть СТ	2.5/23.4	8.6/23.7	-19.8	-15.9
10 % эмульсия	16.6/28.8	11.4/24.6	-20.4	-10.2
Нефть ВК	31.2	31.4	Нет	Нет
10 % эмульсия	31.7	31.7	Нет	Нет

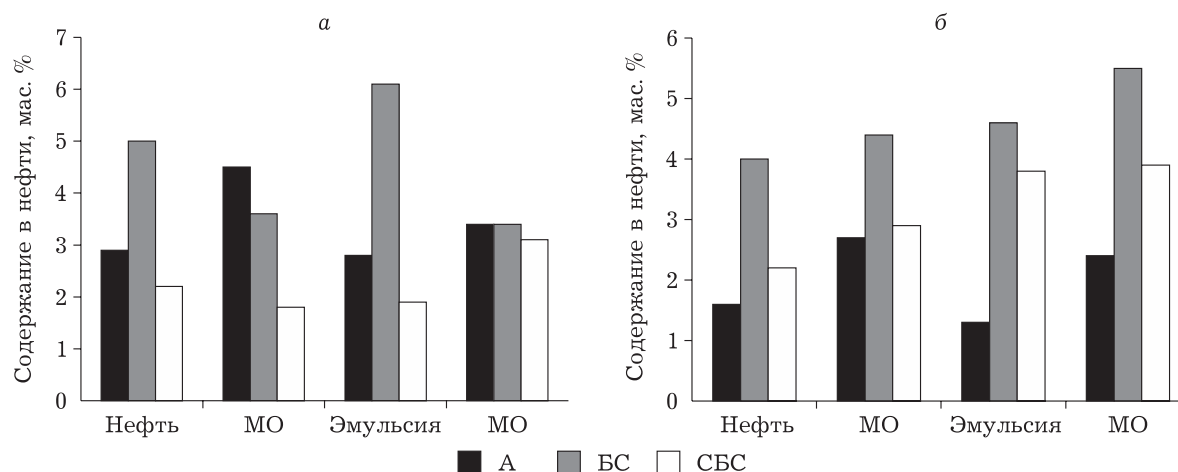


Рис. 3. Компонентный состав нефтей и 10 мас. % эмульсий СТ (а) и ВК (б) до и после МО. А – асфальтены; BS – бензолные смолы; SBS – спиртобензолные смолы. Усл. обозн. см. рис. 1.

смолами, которые не разрушились в процессе выделения.

После МО нефти и эмульсии ВК доля смолисто-асфальтеновых компонентов возрастает (см. рис. 3, б). Наиболее значительное увеличение содержания нефтяных компонентов наблюдается для фракций асфальтенов и бензолных смол в обработанной магнитным полем эмульсии, что может быть также связано со значительным увеличением полярности компонентов водонефтяной эмульсии после МО. В составе последней, в отличие от нефти СТ, присутствуют высокомолекулярные парафиновые углеводороды, молекулы которых являются слабыми диполями. Магнитное поле изменяет поверхностную активность смолисто-асфальтеновых компонентов так, что окружающие их молекулы парафиновых углеводородов образуют на них более упорядоченную и плотную упаковку, что приводит к увеличению количества асфальтеновых и смолистых компонентов [23].

Из полученных данных следует, что после МО малопарафинистой смолистой нефти СТ и эмульсии на ее основе происходит перераспределение парамагнитных и диамагнитных молекул с образованием новых структурных единиц. В высокопарафинистой смолистой нефти ВК и эмульсии наблюдается рост компонентов дисперсной фазы за счет поляризации в магнитном поле дипольных молекул парафиновых углеводородов.

Относительное содержание структурных фрагментов в нефтях и водонефтяных эмульсиях оценивали по спектральным коэффициентам с использованием данных ИК-спектроскопии.

В качестве примера на рис. 4 приведены ИК-спектры асфальтенов нефти и эмульсии СТ. Для определения относительного содержания структурных фрагментов использовали следующие характеристические полосы поглощения (п. п.): 1600 см^{-1} – ароматические связи $\text{C}=\text{C}$ (условное содержание ароматических структур); 1380 см^{-1} – CH_3 -группы (коэффициент разветвленности); 1030 см^{-1} – группы $\text{S}=\text{O}$; 875, 810 и 750 см^{-1} – полосы в “ароматическом триплете”; 720 см^{-1} – $(\text{CH}_2)_n$ -группы в алифатических структурах с $n > 4$ (условное содержание парафиновых структур). Спектральные коэффициенты рассчитывали из отношения интегральной оптической плотности, соответствующей характеристической п. п. (D_i), к интегральной оптической плотности п. п. 1465 см^{-1} (D_{1465}), относящейся к алифатическим связям $\text{C}-\text{H}$ и использованной как внутренний стандарт [24]. Нормирование оптических плотностей соответствующих полос поглощения к полосе 1465 см^{-1} позволяет оценить структурные параметры высокомолекулярных соединений. В табл. 3 приведены значения спектральных коэффициентов высокомолекулярных компонентов нефтей и эмульсий СТ и ВК.

В структуре асфальтенов, выделенных из смолистой нефти СТ после обработки магнитным полем наблюдаются следующие изменения: увеличивается содержание ароматических фрагментов (D_{1600}/D_{1465}) и “триплет” (D_{875}/D_{1465} , D_{810}/D_{1465} , D_{750}/D_{1465}), при этом уменьшается количество групп $\text{S}=\text{O}$ (D_{1030}/D_{1465}). В асфальтенах, выделенных из эмульсии СТ, отмечен небольшой рост содержания ароматических

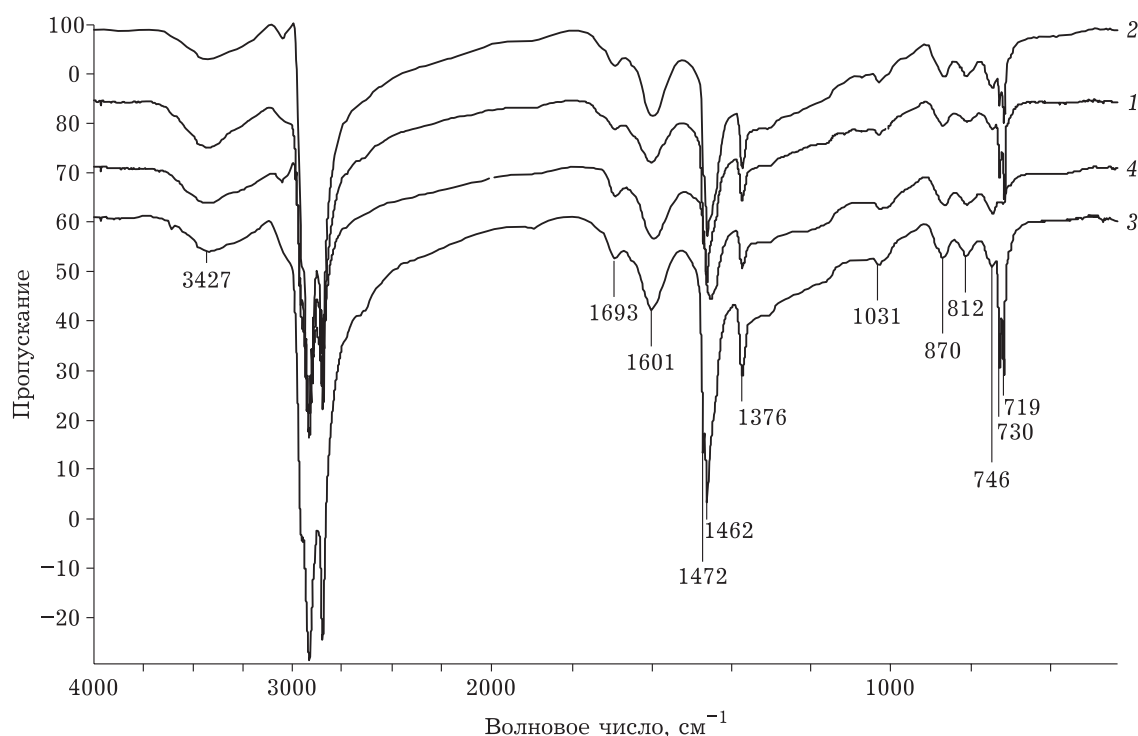


Рис. 4. ИК-спектр асфальтенов образцов СТ до и после МО: 1 – исходная нефть; 2 – обработанная нефть; 3 – исходная эмульсия; 4 – обработанная эмульсия. Обозн. см. рис. 1.

фрагментов и “триплета”, групп S=O, а также снижение количества парафиновых углеводородов (D_{720}/D_{1465}) при увеличении степени их разветвленности (D_{1380}/D_{1465}). Магнитная обработка не приводит к существенным измене-

ниям в алифатической и ароматической структуре смолистых компонентов нефти и эмульсии СТ, за исключением увеличения в спиртобензольных смолах нефти и эмульсии СТ количества групп S=O.

ТАБЛИЦА 3

Спектральные коэффициенты асфальтенов и спиртобензольных смол, выделенных из исследованных нефтей и эмульсий до и после магнитной обработки (МО)

Показатель	Столбовое месторождение (СТ)				Восточно-Каменное месторождение (ВК)			
	Нефть	МО	10 % эмульсия	10 % эмульсия + МО	Нефть	МО	10 % эмульсия	10 % эмульсия + МО
Асфальтены								
D_{1600}/D_{1465}	0.3	0.5	0.3	0.5	0.5	0.5	0.3	0.5
D_{1380}/D_{1465}	0.6	0.6	0.4	0.7	0.8	0.8	0.5	0.6
D_{1030}/D_{1465}	0.5	0.2	0.1	0.3	0.3	0.3	0.2	0.3
D_{875}/D_{1465}	0.1	0.3	0.1	0.3	0.3	0.3	0.1	0.3
D_{810}/D_{1465}	0.1	0.3	0.1	0.3	0.3	0.3	0.1	0.3
D_{750}/D_{1465}	0.1	0.3	0.1	0.3	0.3	0.3	0.1	0.3
D_{720}/D_{1465}	0.5	0.4	0.5	0.3	0.3	0.3	0.5	0.2
Спиртобензольные смолы								
D_{1600}/D_{1465}	0.4	0.3	0.4	0.3	0.3	0.4	0.3	0.4
D_{1380}/D_{1465}	0.7	0.6	0.6	0.7	0.6	0.7	0.7	0.7
D_{1030}/D_{1465}	0.3	0.5	0.3	0.5	0.5	0.3	0.5	0.3
D_{875}/D_{1465}	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1
D_{810}/D_{1465}	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
D_{750}/D_{1465}	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
D_{720}/D_{1465}	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2

После МО высокопарафинистой нефти ВК в асфальтенах не зафиксировано изменений в структуре как ароматических, так и алифатических фрагментов. При этом в асфальтенах, выделенных из эмульсии, отмечен небольшой рост содержания ароматических фрагментов и “триплета”. В слабополярных нейтральных бензольных смолах изменений после МО не наблюдается. И только в составе высокополярных спиртобензольных смол нефти и эмульсии, обработанных магнитным полем, снижается количество групп S=O.

Магнитная обработка практически не влияет на температуру застывания нефти и эмульсии СТ, но снижает температуру застывания эмульсии и нефти ВК на 2.9 и 1.3 °С соответственно. Это может быть связано с различным компонентным составом исследуемых смолистых нефтей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучено влияние магнитного поля на структурно-реологические характеристики двух смолистых нефтей различного состава. Показано, что воздействие магнитного поля на малопарафинистую смолистую нефть и эмульсию на ее основе (10 мас. % воды) сопровождается ростом вязкости в температурном диапазоне до –35 °С. Вязкость обработанной высокопарафинистой смолистой нефти и ее 10 % эмульсии изменяется незначительно. Однако после обработки наблюдается снижение температуры застывания.

Установлено, что после магнитной обработки происходит изменение компонентного состава нефтесодержащих систем: для высокопарафинистой смолистой нефти и 10 % эмульсии отмечено увеличение доли смолисто-асфальтовых компонентов, а обработка малопарафинистой смолистой нефти и 10 % эмульсии приводит к росту количества асфальтенов и снижению доли смолистых компонентов.

Согласно приведенным данным ИК-спектроскопии, спектральные характеристики асфальтенов, бензольных и спиртобензольных смол остаются постоянными до и после магнитной обработки. Таким образом, можно утверждать, что обработка магнитным полем не приводит к изменению химической структуры высокомолекулярных компонентов нефти, изменяя лишь их физические свойства.

Работа выполнена в рамках Государственного задания Института химии нефти СО РАН при финансовой поддержке Минобрнауки России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Speight J. G. The Chemistry and Technology of Petroleum. CRC Press Taylor & Francis Group, 2014. 953 p.
- 2 Frenier W. W., Zainuddin M., Venkatesan R. Organic Deposits in Oil and Gas Production. Society of Petroleum Engineers, 2011. 362 p.
- 3 Лоскутова Ю. В., Морозова А. В., Волкова Г. И. Воздействие физических полей на высокосмолистую нефть // Журн. Сибирского федер. ун-та. Сер.: Химия. 2021. Т. 14, № 2. С. 226–233.
- 4 Souas F., Safri A., Benmounah A. A review on the rheology of heavy crude oil for pipeline transportation // Petroleum Research. 2021. Vol. 6, No. 2. P. 116–136.
- 5 Loskutova Yu. V., Yudina N. V. Destruction of a water-in-oil emulsion under combined action of a low-frequency acoustic field and a demulsifier // Petroleum Chemistry. 2022. Vol. 62, No. 5. P. 506–514.
- 6 Marfin E. A., Kadyirov A. I., Karaeva Y. V., Gabdukaev M. M. Experimental study of the effect of ultrasonic treatment on the rheological properties of oil and paraffin-containing oil // Proceeding of the Conf. “Geomodel 2019”. Gelendzhik, Sept. 9–13, 2019. P. 1–5.
- 7 Chen X., Hou L., Li W., Li S. Influence of electric field on the viscosity of waxy crude oil and micro property of paraffin: A molecular dynamics simulation study // J. Mol. Liq. 2018. Vol. 272. P. 973–981.
- 8 Taghavi H., Ashoori S., Mousavi S. H. Analyzing electrical field effect on asphaltene deposition // Pet. Sci. Technol. 2018. Vol. 36, No. 7. P. 487–493.
- 9 Liu Y., Yang J., Jiang W., Chen Y., Yang C., Wang T., Li Y. Experimental studies on the enhanced performance of lightweight oil recovery using a combined electrocoagulation and magnetic field processes // Chemosphere. 2018. Vol. 205. P. 601–609.
- 10 Chow R., Sawatzky R., Henry D., Babchin A., Wang Y., Cherney L., Humphreys R. Precipitation of wax from crude oil under the influence of a magnetic field // J. Can. Pet. Technol. 2000. Vol. 39, No. 6. P. 56–61.
- 11 Hou L., Li W., Li S., Chen Y. Molecular dynamics simulation of magnetic field influence on waxy crude oil // J. Mol. Liq. 2018. Vol. 249. P. 1052–1059.
- 12 Пивоварова Н. А. Магнитные технологии добычи и переработки углеводородного сырья. М.: Газпром Экспо, 2009. 119 с.
- 13 Loskutova Y. V. Effect of magnetic fields on the paramagnetic, antioxidant, and viscous properties of oils and resin-asphaltene components / Chemical Engineering Methods and Technology. Asphaltenes: Characterization, Properties and Applications. J. A. Duncan (Ed.). Nova Science Publishers, 2010. P. 121–144.
- 14 Инюшин Н. В., Каштанова Л. Е., Лаптев А. Б., Мугтабаров Ф. К. Магнитная обработка промышленных жидкостей. Уфа: Реактив, 2000. 58 с.
- 15 Классен В. И. Омагничивание водных систем. М.: Химия, 1982. 296 с.
- 16 Lesin V. I., Koksharov Yu. A., Khomutov G. B. Viscosity of liquid suspensions with fractal aggregates: Magnetic nanoparticles in petroleum colloidal structures // Colloids Surf., A. 2011. Vol. 392. P. 88–94.
- 17 Шайхулов А. М., Бойчук А. А., Докичев В. А. Влияние магнитного поля на деэмульсацию водонефтяной эмульсии пласта А4 Киянгопского месторождения // Нефтегазовое дело. 2014. Т. 12, № 1. С. 141–148.
- 18 Tung N. P., Vuong N. V., Long B. Q., Vinh N. Q., Hung P. V., Hue V. T., Hoe L. D. Studying the mechanism of magnetic field influence on paraffin crude oil viscosity and wax dep-

- osition reductions // Proceedings of the SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, Jakarta, Indonesia, April 2001. P. 17–19.
- 19 Tao R., Xu X. Reducing the viscosity of crude oil by pulsed electric or magnetic field // *Energy Fuels*. 2006. Vol. 20, No. 5. P. 2046–2051.
- 20 Злобин А. А. Изучение механизма магнитной активации нефти для защиты добывающих скважин от асфальтеносмолопарафиновых отложений // *Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело*. 2017. Т. 16, № 1. С. 49–63.
- 21 Romanova Yu. N., Maryutina T. A., Musina N. S., Yurtov E. V., Spivakov B. Ya. Demulsification of water-in-oil emulsions by exposure to magnetic field // *J. Pet. Sci. Eng.* 2019. Vol. 179. P. 600–605.
- 22 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. № 5 (567). С. 21–23.
- 23 Лоскутова Ю. В., Юдина Н. В. Влияние магнитного поля и химических реагентов на структурно-механические характеристики высокопарафинистой нефти // *Химия уст. разв.* 2020. Т. 28, № 2. С. 186–192.
- 24 Глебовская Е. А. Применение инфракрасной спектроскопии в нефтяной геохимии. Л.: Недра, 1971. 140 с.