

УДК 665.61.033.28

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФЛОКУЛЯЦИИ И ОСАЖДЕНИЯ
АСФАЛЬТЕНОВ ТЯЖЕЛЫХ НЕФТЕЙ УФ-
СПЕКТРОФОТОМЕТРИЧЕСКИМ КИНЕТИЧЕСКИМ АНАЛИЗОМ
М.Р. Якубов, Д.Н. Борисов, С.Г. Якубова, Г.Р. Абилова, Д.В. Милордов
Институт органической и физической химии
им. А.Е. Арбузова КазНЦ РАН**

**STUDY OF FLOCCULATION AND SEDIMENTATION
OF ASPHALTENES IN HEAVY OIL BY UV-SPECTROPHOTOMETRIC
KINEMATIC ANALYSIS
M.R. Yakubov, D.N. Borisov, S.G. Yakubova, G.R. Abilova, D.V. Milordov
A.E. Arbuzov Institute of Organic and Physical Chemistry Kazan Research
Center of the Russian Academy of Sciences**

E-mail: yakubovmr@mail.ru

Аннотация. Для изучения процессов флокуляции и осаждения асфальтенов в растворе толуола при добавлении *n*-гептана выше точки начала флокуляции использован УФ-спектрофотометр с автоматической регистрацией оптической плотности во времени. Оптическая плотность после начала процесса флокуляции асфальтенов увеличивается, а при выпадении частиц асфальтенов - снижается. На примере асфальтенов тяжелых нефтей Ашальчинского и Мордово-Кармальского месторождений показано, что характер протекания этих процессов согласуются с особенностями их структурно-группового состава. Также показана возможность использования спектрофотометрического метода для определения поведения асфальтенов в процессах флокуляции и осаждения в присутствии синтетического амфифила - нонилфенола.

Abstract. To study the processes of asphaltenes flocculation and sedimentation in toluene solution on addition of *n*-heptane above flocculation start point, an UV-spectrophotometer with automatic optical density over time registration was used. It has been found that optical density increases once flocculation has started and decreases after sedimentation of asphaltenes. By example of asphaltenes of heavy oils from the Ashalchinskoe and Mordovo-Karmalskoye oil fields it has been shown that these processes are consistent with characteristics of structural-group composition. Also, the potency of spectrophotometric method to evaluate asphaltenes behavior while flocculation and sedimentation in presence of a synthetic amphiphile–nonylphenol has been demonstrated.

Ключевые слова: тяжелая нефть, асфальтены, флокуляция, осаждение, оптическая плотность.

Key words: heavy oil, asphaltenes, flocculation, precipitation, optical density.

Нефтяные асфальтены наряду с парафинами являются основными компонентами, образующими кольматирующие отложения в поровом пространстве пласта [1]. В асфальтеновых агрегатах существуют сильные межмолекулярные связи, такие, как водородные и π -связи, позволяющие агрегатам находиться в стабильном состоянии в нефти и даже в толуольном растворе [2, 3]. Проблема осаждения асфальтенов при значительном изменении давления, температуры и состава нефти существует в процессах добычи, транспортировки и переработки нефти [1,4].

Для определения состава нефти обычно используют разделение нефти на четыре химически однородные фракции: насыщенные углеводороды,

ароматические углеводороды, смолы и асфальтены - SARA-анализ [5, 6]. Отношения (ароматические углеводороды+смолы)/(насыщенные углеводороды+асфальтены) [7] и смолы/асфальтены [8, 9] используют для прогнозирования устойчивости асфальтеновых частиц в нефти. При низких значениях этих отношений асфальтеновые частицы могут объединяться и образовывать агрегаты большего размера. Анализ большого количества данных, основанных на SARA-анализе, показывает, что точность первого параметра для прогнозирования устойчивости нефти выше, чем отношение смолы/асфальтены [10].

Асфальтены являются гетерогенными по своим основным физико-химическим свойствам, таким, как молекулярная масса, размер молекул, растворимость, полярность, элементный состав и т.д. [11]. Одним из путей исследования асфальтенов является их разделение на фракции [12]. Для фракционирования асфальтенов применяют подходы, связанные с различной растворимостью фракций асфальтенов. Часто используются смеси растворителей толуол/*n*-пентан (толуол/*n*-гептан) или бензол/метанол (толуол/метанол), в различных соотношениях, один из которых служит растворителем асфальтенов, а другой – осадителем [13, 14, 15]. Наиболее полярная фракция асфальтенов с самым большим средним размером частиц и самой высокой ароматичностью обладает наибольшей тенденцией к флокуляции [16] и осаждается первой. Добавление осадителя приводит к осаждению второй фракции и т.д.

Гутиерес и сотр. [17] подтвердили, что асфальтены являются смесью соединений с различной растворимостью, и показали, что в ароматических растворителях асфальтены находятся в виде коллоидной фазы, образованной слаборастворимой фракцией A1, диспергированной растворимой фракцией A2. Предположено, что устойчивость суммарных асфальтенов зависит от присутствия наиболее растворимой фракции с низкой ароматичностью [18].

В связи с существованием проблемы осаждения и отложения асфальтенов в нефтяной промышленности применяются ингибиторы или стабилизаторы асфальтенов. Если ингибиторы асфальтенов могут кинетически ингибировать или замедлять процесс выделения фазы асфальтенов, то нефти могут транспортироваться и перерабатываться без выделения асфальтенов [19]. Даже если ингибиторы асфальтенов не ингибируют процесс выделения фазы асфальтенов полностью, они могут действовать как дисперсанты для стабилизации относительно мелких асфальтеновых частиц размером менее микрометра и сохранять частицы диспергированными в нефти. Механизм ингибирования агрегации асфальтенов может быть представлен на основе молекулярной термодинамики. В соответствии с этой моделью ингибиторы присоединяются к асфальтеновым агрегатам через активные места и образуют часть окружения полиароматического ядра [20].

В качестве стабилизаторов асфальтенов рядом исследователей изучено влияние различных амфифилов ароматической природы [21-27]. Они действуют подобно смолам, пептизируя асфальтены и удерживая их в растворе [21]. Чанг и Фоглер [22] использовали серию алкилбензолпроизводных амфифилов для исследования взаимодействий асфальтены-амфифилы. Их результаты показали, что эффективность амфифилов стабилизировать асфальтены в основном контролируется двумя факторами: силой взаимодействий асфальтены-амфифил, которая связана с полярностью головной группы, и способностью амфифилов образовывать стерически стабилизированные слои, зависящей от длиной их алкильного хвоста. Гонзалес и сотр. [23] установили, что эффективность нонилфенола выше, чем эффективность диоксиэтилированного нонилфенола, хотя обе амфифильные головные группы содержат гидроксильные группы (-ОН). С другой стороны, оксиэтилированные нонилфенолы 18, 40 и 100 (Oxiteno Renex) эффективны в ингибировании

осаждения асфальтенов, независимо от природы нефти [24].

Результаты [25] указывают на более высокую активность нонилфенолформальдегидной смолы по сравнению с *n*-(*n*-нонил)фенолом. Стефенсон и сотр. [26] установили, что асфальтены могут быть диспергированы в нефти добавлением диспергирующего количества моно- или дизамещенных алкилфенолформальдегидных смол, содержащих линейные или разветвленные алкильные заместители с числом атомов углерода от 4 до 24. Миллер и сотр. [27] также использовали смеси алкилфенолформальдегидной смолы с оксиалкильными аминами в качестве дисперсантов асфальтенов.

Осаждение асфальтенов можно оценить экспериментально определением точки, при которой асфальтены начинают флокулировать (точка «онсет»). Для этой цели используются такие методы, как тест пятна, микроскопию, вискозиметрию, электропроводность, оптическое пропускание, лазерный анализ размера частиц и фильтрование [28]. В основном используется титрование асфальтенов или нефти в толуоле *n*-гептаном, на основе которого эффективность ингибиторов определяется по сдвигу начала флокуляции. Только несколькими исследователями применяются для изучения устойчивости асфальтенов кинетические измерения флокуляции во времени [4, 19, 29-33].

Изменение кажущегося поглощения при 700 нм как функции от времени (начальная скорость флокуляции асфальтенов) изучено Остланд и др. [16, 29] с использованием Cary 100 Bio UV-vis спектрофотометра. При добавлении *n*-гептана, в количестве, достаточном для флокуляции асфальтенов, к растворимой фракции асфальтенов кажущееся поглощение не изменяется в исследуемом интервале времени, тогда как флокуляция нефракционированных асфальтенов и нерастворимой фракции асфальтенов происходила быстро [4]. Исключив влияние поглощения света агрегатами асфальтенов, такие кинетические измерения использованы

Остланд и др. [30] для определения скорости, с которой асфальтены образуют агрегаты с и без амфифильных молекул, содержащих кислотные и основные функциональные группы. Измерения ближней ИК-спектроскопией оптической плотности от времени использованы для систем, содержащих асфальтены и нафтенновые кислоты, для мониторинга изменений в размере агрегатов [31]. Эти эксперименты выполнены на системах, в которых отношение *n*-гептан/толуол было несколько выше, чем точка начала флокуляции асфальтенов. Проведено изучение кинетики агрегации асфальтенов вблизи точки начала флокуляции с использованием измерений сфокусированного лазерного луча отражения (FBRMs) с регистрацией каждые 10 сек на 90 каналах в присутствии трех различных коммерческих добавок [32]. Боукхерисса и сотр. [33] исследовали влияние ионных жидкостей на кинетику флокуляции также во времени. Растворы толуола, содержащие асфальтены и дисперсант, были смешаны с *n*-гептаном при отношении *n*-гептан/толуол 2. Концентрация асфальтенов в фильтрах была определена после перемешивания в течение 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 и 80 мин при помощи УФ-спектрофотометрии. Крайваттанавонг и сотр. [19] использовали измерение динамической мутности как функцию от времени для изучения действия химических добавок на осаждение асфальтенов из нефти. Если асфальтеновые частицы выпадают, то в результате увеличивается значение пропускания.

Почти все эти методы используются для изучения флокуляции асфальтенов. Следует отметить, что после процесса флокуляции следует процесс осаждения. Поэтому важным является наблюдение поведения асфальтенов в обоих процессах. Целью данного исследования является применение УФ-спектрофотометрического приема с автоматической регистрацией оптической плотности во времени для исследования поведения флокуляции и осаждения асфальтенов.

Для исследования использованы тяжелые нефти Ашальчинского и

Мордово-Кармальского месторождений (табл. 1). Для SARA фракционного анализа (насыщенные углеводороды, ароматические углеводороды, смолы и асфальтены) асфальтены (А) осаждены из нефтей *n*-гептаном в соответствии с ASTM D3272-90. Мальтены разделены на насыщенные углеводороды (НУ), ароматические углеводороды (АУ) и смолы (С) путем адсорбционной колоночной хроматографии на силикагеле АСКГ. Полученные данные позволяют рассчитать соотношение смол к асфальтенам (С/А), а также индекс коллоидной устойчивости (КУ) нефтей по формуле [7]:

$$КУ = (АУ+С)/(НУ+А)$$

Для хроматографии использованы *n*-гептан, толуол и этанол/толуол в соотношении 1:1 (об/об). После элюирования фракций растворители отгонялись на роторном испарителе в вакууме при 60°C. Состав и свойства нефтей представлены в табл. 1.

Таблица 1

Состав и свойства исследованных тяжелых нефтей

Объект	Компонентный состав, мас. %						Вязкость, сСт	Плотность (г/см ³)
	НУ	АУ	С	А	С/А	Индекс КУ		
Нефть-1, Ашальчинское м-е	50,0	36,8	8,6	4,6	1,87	0,83	3083	0,9540
Нефть-2, Мордово-Кармальское м-е	38,9	45,5	10,8	4,8	2,25	1,30	879	0,9487

Для количественного сравнения характеристик структурно-группового состава асфальтенов на основе их ИК спектров использовали полосу поглощения 1600 см⁻¹ ароматических С=С-связей в качестве эталонной полосы поглощения. Использована коррекция базовой линией всех пиков в области 650-1800 см⁻¹, в которой базовая линия объединяет две точки, включающие пик С-Н связей в СН₂ группах (720 см⁻¹) и карбонила (1720 см⁻¹), и рассчитаны отношения интегральных оптических плотностей полос структурных групп и эталонной полосы поглощения.

Использованы следующие характеристические полосы поглощения (п.п.): 1740 см^{-1} - C=O-группы в сложных эфирах, 1710 см^{-1} - C=O-группы в кислотах, 1640 см^{-1} - C=O-группы в амидах, 1380 см^{-1} - CH_3 -группы, 1030 см^{-1} - S=O-группы, 720 см^{-1} - $n\text{CH}_2$ -группы в алифатических структурах с $n \geq 4$. Кроме этого, для оценки ароматичности асфальтенов использовано отношение оптических плотностей п.п. 1600 см^{-1} ароматических C=C-связей и п.п. 1460 см^{-1} алифатических C-H-связей. Инфракрасные спектры асфальтенов записаны на IR-FT спектрометре Spectrum One (Perkin Elmer). Асфальтены сначала растворяли в небольшом количестве хлористого метилена, а потом наносили на пластинку из NaCl по капле, испаряя растворитель.

Для определения точки начала флокуляции асфальтенов приготовлен рабочий раствор асфальтенов в толуоле концентрацией 0.2 мас.%. Смешением аликвот рабочего раствора асфальтенов и *n*-гептана в различных пропорциях в спектрофотометрической ячейке готовили растворы с одинаковой начальной концентрацией асфальтенов, но разными конечными концентрациями алкана. Для пошагового добавления *n*-гептана по 0.1 мл использовали микропипетку. Спектрофотометрическое исследование фракций асфальтенов проведено на УФ-спектрофотометре КФК-2 (ЗОМЗ, Россия) с регистрацией оптической плотности во времени на длине волны 610 нм. Оптическая плотность регистрировалась с интервалом в 0,5 сек в течение 5000 сек. Кинетические исследования показали, что оптическая плотность не изменялась в течение указанного времени при соотношении *n*-гептан/толуол до достижения точки начала флокуляции. Минимальное соотношение *n*-гептан/толуол, при котором оптическая плотность стала увеличиваться, соответствует началу флокуляции асфальтенов. Точка начала флокуляции асфальтенов нефтей 1 и 2 наблюдается при объемном соотношении *n*-гептана и толуола 0,8 и 1,4, соответственно.

В качестве нефтерастворимого амфифила использовали *изо*-нонилфенол (НФ), производимый ОАО «Нижнекамскнефтехим». Влияние НФ на кинетику флокуляции и осаждения асфальтенов непрерывно регистрировалось на спектрофотометре в кинетическом режиме на длине волны 610 нм. Как показано в табл. 2, к 1 мл толуола, содержащего 5 г/л асфальтенов нефти-1, был добавлен 1 мл раствора в толуоле НФ, содержащегося в количестве от 0 до 20 г/л, и этот раствор был смешан с *n*-гептаном в соотношении *n*-гептан/толуол 1,5 (3 мл *n*-гептана). К 1 мл толуола, содержащего 6,5 г/л асфальтенов нефти-2, был добавлен 1 мл раствора в толуоле НФ, содержащегося в количестве от 0 до 26,8 г/л, и этот раствор был смешан с *n*-гептаном в соотношении *n*-гептан/толуол 1,8 (3,6 мл *n*-гептана). В результате три разные концентрации добавок были использованы в смеси (0,4, 1 и 4 г/л) при постоянной концентрации асфальтенов 1 г/л, но с разным соотношением *n*-гептан/толуол – 1,5 для асфальтенов нефти-1 и 1,8 для асфальтенов нефти-2.

Таблица 2

Исходная и конечная концентрация асфальтенов и НФ в растворах.

Концентрация	Нефть-1	Нефть-2
Исходная в толуоле, г/л		
асфальтенов	5	6,7
НФ	2	2,7
НФ	5	6,7
НФ	20	26,8
Конечная в смеси гептан/толуол, г/л		
асфальтенов	1	1
НФ	0,4	0,4
НФ	1	1
НФ	4	4

Традиционная аналитическая система разделения мальтенов нефти с использованием силикагеля и растворителей (*n*-гептан, толуол и толуол/метанол) не позволяет отделить ароматические углеводороды от ароматических слабополярных соединений, которые обычно остаются в

составе смол [5]. Но это не влияет на результаты определения фазовой стабильности нефти к выпадению асфальтенов, оцененной по данным SARA анализа [7]. Если использовать индекс КУ в качестве ключевого параметра, определяющего устойчивость нефтей к осаждению асфальтенов, то нефть-1 характеризуется большей тенденцией к осаждению, чем нефть-2, для которых величины данного показателя составляют 0,83 и 1,40, соответственно (табл. 1). Как известно, тенденция к осаждению асфальтенов зависит также и от отношения смолы/асфальтены [8, 9]. По этому показателю устойчивость нефти-1 также ниже.

Чтобы оценить коллоидную устойчивость нефти важно принимать во внимание не только содержание асфальтенов, но также и их структурные характеристики. Для структурной характеристики асфальтенов использованы относительные величины полос поглощения в ИК Фурье спектрах в интервале $2000-600\text{ см}^{-1}$. Отношения оптических плотностей характеристических полос поглощения и контрольной полосы, соответствующих содержанию структурных групп в средней молекуле, представлены в табл. 3. Анализ содержания структурных групп показывает, что основное отличие в составе асфальтенов нефтей 1 и 2 заключается в большей ароматичности асфальтенов нефти-1. Кроме того, асфальтены нефти-1 содержат несколько меньше алкильных заместителей, но при этом суммарное содержание сульфоксидных групп ($\text{S}=\text{O}$), карбонильных групп ($\text{C}=\text{O}$) в амидах и эфирах является более высоким, чем для асфальтенов нефти-2.

Таблица 3

Структурно-групповой состав асфальтенов

Асфальтены	Ароматичность	Содержание структурных групп				
		CH_2+CH_3	SO	CO (амиды)	CO (кислоты)	CO (эфиры)
Нефть-1	0.52	1.8	1.0	0.8	0.4	0.3
Нефть-2	0.49	2.2	0.7	0.7	0.4	0.2

На рис. 1 и 2 представлено поведение асфальтенов концентрацией 0.2 мас.% в толуоле при добавлении различного объема *n*-гептана. Точка начала флоккуляции асфальтенов соответствует минимальному соотношению *n*-гептан/толуол (об./об.), при котором наблюдается увеличение оптической плотности по времени. Асфальтены нефти 1 менее стабильны, чем асфальтены нефти 2, так как точка начала флоккуляции ниже – 0.8 и 1.4 соответственно.

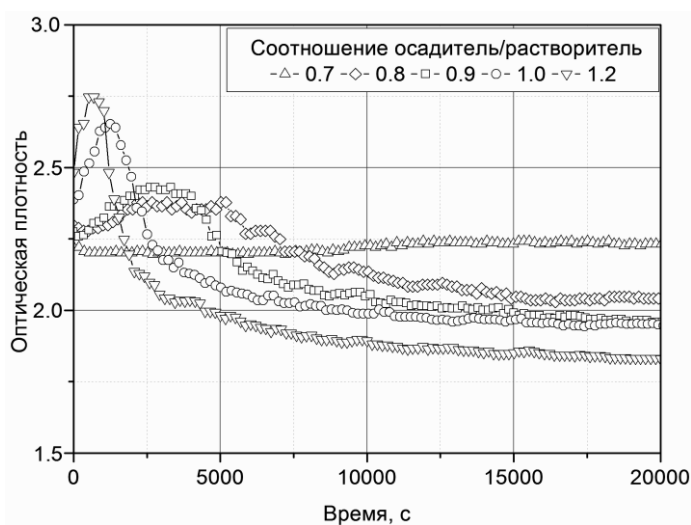


Рис. 1. Изменение оптической плотности растворов асфальтенов нефти-1 во времени в зависимости от соотношения осадитель/растворитель (исходная концентрация асфальтенов в толуоле 0.2 мас.%)

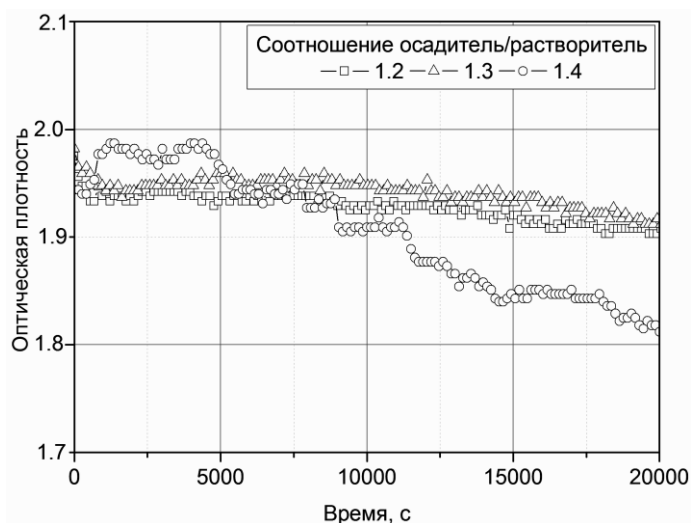


Рис. 2. Изменение оптической плотности растворов асфальтенов нефти-2 во времени в зависимости от соотношения осадитель/растворитель (исходная концентрация асфальтенов в толуоле 0.2 мас.%)

Процесс флокуляции и последующего осаждения асфальтенов могут ингибировать различные полярные амфифилы (дисперсанты). Поэтому было определено влияние ингибитора осаждения асфальтенов НФ на агрегацию асфальтенов путем измерения изменений оптической плотности их раствора в кинетическом режиме. Как и количество осадителя, необходимое для инициирования флокуляции, выбор концентрации асфальтенов несомненно влияет на скорость процесса данного процесса. Тем не менее, существует возможность сопоставления устойчивости систем с разным количеством ингибиторов при одинаковой концентрации асфальтенов и таком же количестве НФ.

На рис. 3 приведены кинетические кривые оптической плотности при добавлении *n*-гептана к раствору асфальтенов нефти-1, содержащему НФ в разных концентрациях. На кривой эксперимента без амфифила после добавления к раствору асфальтенов в толуоле критической концентрации *n*-гептана наблюдается увеличение оптической плотности, которое связано с повышением вклада в рассеяние света растущими в процессе флокуляции частицами асфальтенов. Максимум оптической плотности соответствует завершению процесса роста частиц асфальтенов. Дальнейшее снижение оптической плотности регистрирует уменьшение содержания асфальтенов в растворе в результате осаждения. Присутствие НФ в концентрации 0,4 г/л не оказывает влияния на вид кривой. При использовании 1 г/л НФ выпадение асфальтенов замедляется, как можно видеть по уширению максимума оптической плотности и сдвигу его на более позднее время. При концентрации НФ 4 г/л оптическая плотность увеличивается незначительно, далее следует плато, после которого восстанавливается первоначальное значение оптической плотности. Это означает, что наблюдается стабилизация асфальтенов и они не выпадают. Следовательно, добавление НФ в концентрации 4 г/л позволяет полностью ингибировать осаждение асфальтенов. Оптическая плотность асфальтенов

нефти-2 в толуоле с НФ в разных концентрациях после добавления *n*-гептана изменяется аналогично.

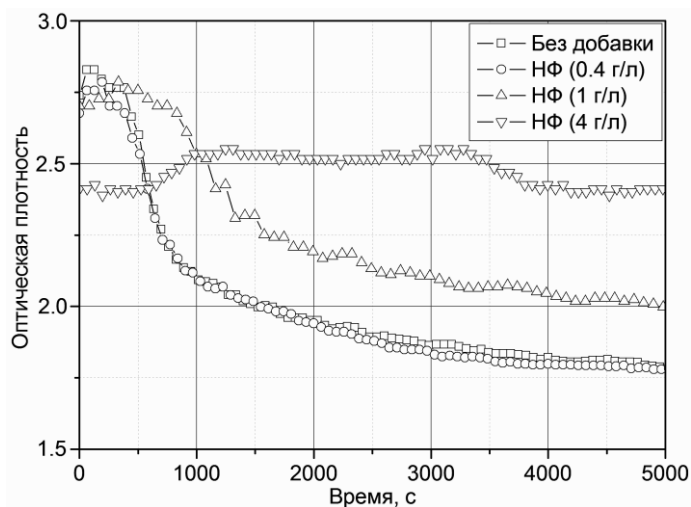


Рис. 3. Влияние различного количества НФ в гептан/толуоле на осаждение нефти 1 асфальтенов (концентрация асфальтенов в гептан/толуоле 1 г/л, соотношение *n*-гептан/толуол 1.5).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для исследования процессов флокуляции и осаждения асфальтенов тяжелых нефтей использованы кинетические исследования с помощью УФ-спектрофотометрии. Толуольные растворы асфальтенов смешивались с *n*-гептаном и измерялась оптическая плотность во времени. После добавления *n*-гептана к раствору асфальтенов в толуоле, оптическая плотность сначала увеличивается, а затем снижается. Показано, что на склонность асфальтенов к осаждению обусловлена ароматичностью, которая может быть определена с помощью метода ИК-Фурье спектроскопии.

Кинетические исследования с помощью УФ-спектрофотометрии можно также использовать для тестирования ингибиторов осаждения асфальтенов и определения их оптимальной концентрации.

Список литературы

1. Mullins, O.C. *Asphaltenes, Heavy Oils, and Petroleomics*. – New York: Springer, 2006. – 692 p.
2. Akbarzadeh, K. Asphaltenes – problematic but rich in potential // *Oilfield Review*. – 2007. – V. 19. – P. 22-43.
3. Liao, Z. Adsorption/occlusion characteristics of asphaltenes: Some implication for asphaltene structural features // *Energy Fuels*. – 2005. – V. 1. – P. 180 -186.
4. Speight, J.G. Petroleum asphaltenes part 1: asphaltenes, resins and the structure of petroleum // *Oil & Gas Science and Technology*. – 2004. – V. 59. – P. 467-477.
5. Islas-Flores, C.A., Buenrostro-Gonzalez, E., Lira-Galeana, C. Comparisons between open column chromatography and HPLC SARA fractionations in petroleum // *Energy Fuels*. – 2005. – V. 19. – P. 2080 2088.
6. ASTM D2007-03 (2008). Standard Test Method for Characteristic Groups in Rubber Extender and Processing Oils and Other Petroleum-Derived Oils by the Clay-Gel Absorption Chromatographic Method.
7. Loeber, L. Bitumen in colloid science: a chemical, structural and rheological approach // *Fuel*. – 1998. – V. 77. – P. 1443-1450.
8. Carnahan, N.F. Properties of resins extracted from boscan crude oil and their effect on the stability of asphaltenes in Boscan and Hamaca crude oils // *Energy Fuels*. – 1999. – V. 13. – P. 309-314.
9. Khvostichenko, D.S., Andersen, S.I. Interactions between asphaltenes and water in solutions in toluene // *Energy Fuels*. – 2010. – V. 24. – P. 2327-2336.
10. Asomaning, S. Test methods for determining asphaltene stability in crude oils // *Pet. Sci. Technol.* – 2003. – V. 21. – P. 581-590.
11. Rogel, E. Theoretical estimation of the solubility parameter distributions of asphaltenes, resins and oils from crude oils and related materials // *Energy Fuels*. – 1997. – V. 11. – P. 920-925.
12. Budeebazar, A. Stability of petroleum asphaltene fractions in model hydrocarbon systems // *Energy Fuels*. – 2004. – V. 18. – P. 1792-1797.
13. Acevedo, S. Structural analysis of soluble and insoluble fractions of asphaltenes isolated using the PNP method. Relation between asphaltene structure and solubility // *Energy Fuels*. – 2004. – V. 18. – P. 305-311.

14. Yang, X., Hamza, H., Czarnecki, J. Investigation of subfractions of Athabasca asphaltenes and their role in emulsion stability // *Energy Fuels*. – 2004. – V. 18. – P. 770-777.
15. Trejoa, F., Centenoa, G., Ancheytaa, J. fractionation and characterization of asphaltenes from heavy and light crude oils // *Fuel*. – 2004. – V. 83. – P. 2169-2175.
16. Gutiérrez, L.B. A method for structural studies and stability of asphaltene colloids // *Energy Fuels*. – 2001. – V. 15. – P. 624-628.
17. Östlund, J.-A. Characterization of fractionated asphaltenes by UV-vis and NMR self-diffusion spectroscopy // *Journal of Colloid and Interface Science*. – 2004. – V. 271. – P. 372-380.
18. Wattana, P., Fogler, H.S., Yen, A. Evaluation of a novel method to study oil stability // In: 3rd International Conference on Petroleum Phase Behavior and Fouling, AIChE, New Orleans. 2002.
19. Kraiwattanawong, K. // Effect of asphaltene dispersants on aggregate size distribution and growth // *Energy Fuels*. – 2009. – V. 23. – P. 1575-1582.
20. Rogel, E. Effect of Inhibitors on Asphaltene Aggregation: A Theoretical Framework // *Energy Fuels*. – 2011. – V. 25. – P. 472-481.
21. León, O. Study of the adsorption of alkyl benzene-derived amphiphiles on asphaltene particles // *Langmuir*. – 1999. – V. 15. – P. 7653-7657.
22. Chang, C.-L., Fogler, H.S. asphaltene stabilization in alkyl solvents using oil-soluble amphiphiles // *Soc. Pet. Eng.* – 1993. P. 339-349.
23. González, G., Middea, A. Peptization of asphaltenes by various oil soluble amphiphiles // *Colloids and Surfaces*. – 1991. – V. 52. – P. 207.
24. Junior, L.C.R., Ferreira, M.S., da Silva Ramos, A.C. Inhibition of asphaltene precipitation in Brazilian crude oils using new oil soluble amphiphiles // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2006. – V. 51. – P. 26-36.
25. León, O. The influence of the adsorption of amphiphiles and resins in controlling asphaltene flocculation // *Energy Fuels*. – 2001. – V. 15. – P. 1028-1032.
26. Stephenson W. K., Kaplan M. // U.S. Patent 5021498. 1991.
27. Miller D., Vollmer A., Feustel M., Klug, P. // U.S. Patent 6063146. 2000.
28. Clarke, P.F., Pruden, B.B. Asphaltene precipitation from Cold Lake and Athabasca bitumens // *Petroleum Science and Technology*. – 1998. – V. 16. – P. 287-305.
29. Östlund, J.-A. Flocculation behavior of asphaltenes in solvent/nonsolvent systems // *J. Colloid Interface Sci.* – 2002. – V. 253. – P. 150-158.

30. Östlund, J.-A. Functional groups in fractionated asphaltenes and the adsorption of amphiphilic molecules // *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*. – 2004. – V. 234. – P. 95–102.
31. Östlund, J.-A. Interactions between asphaltenes and naphthenic acids // *Energy Fuels*. – 2003. – V. 17. – P. 113-119.
32. Marugán, J. Characterization of the asphaltene onset region by focused-beam laser reflectance: a tool for additives screening // *Energy Fuels*. – 2009. – V. – 23. – P. 1155-1161.
33. Boukherissa, M. Ionic Liquids as dispersants of petroleum asphaltenes // *Energy Fuels*. – 2009. – V. 23. – P. 2557-2564.
34. McLean, J. D., Kilpatrick, P.K. Comparison of precipitation and extrography in the fractionation of crude oil residua // *Energy Fuels*. – 1997. – V. 11. – P. 570-585.

Сведения об авторах

Якубов Махмут Ренатович, кандидат химических наук, доцент, заведующий лабораторией переработки нефти и природных битумов (ПНПБ), Институт органической и физической химии им. А.Е. Арбузова Казанского научного центра Российской академии наук, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: yakubovmr@mail.ru, yakubov@iopc.ru

Борисов Дмитрий Николаевич, кандидат химических наук, старший научный сотрудник лаборатории ПНПБ, Институт органической и физической химии им. А.Е. Арбузова Казанского научного центра Российской академии наук, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: boriku@gmail.com

Якубова Светлана Габидуллиновна, кандидат химических наук, научный сотрудник лаборатории ПНПБ, Институт органической и физической химии им. А.Е. Арбузова Казанского научного центра Российской академии наук, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: yakubovasg@mail.ru

Абилова Гузалия Рашидовна, инженер-исследователь лаборатории ПНПБ, Институт органической и физической химии им. А.Е. Арбузова Казанского научного центра Российской академии наук, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: abiliti7@yandex.ru

Милордов Дмитрий Валерьевич, младший научный сотрудник лаборатории ПНПБ, Институт органической и физической химии им. А.Е. Арбузова Казанского научного центра Российской академии наук, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: milordoff@ya.ru

Authors

M. R. Yakubov, PhD (Chem.), Assistant Professor, Chief of Crude Oil and Natural Bitumen Treatment Laboratory, Arbuzov Institute of Organic and Physical Chemistry–Kazan Research Center of the Russian Academy of Sciences, Kazan, Russian Federation

E-mail: yakubov@iopc.ru, yakubovmr@mail.ru

D.N. Borisov, PhD (Chem.), Senior Research Assistant of Crude Oil and Natural Bitumen Treatment Laboratory, Arbuzov Institute of Organic and Physical Chemistry–Kazan Research Center of the Russian Academy of Sciences, Kazan, Russian Federation

E-mail: boriku@gmail.com

S. G. Yakubova, PhD (Chem.), Research Assistant of Crude Oil and Natural Bitumen Treatment Laboratory, Arbuzov Institute of Organic and Physical Chemistry–Kazan Research Center of the Russian Academy of Sciences, Kazan, Russian Federation
E-mail: yakubovasg@mail.ru

G. R. Abilova, Research Engineer, Arbuzov Institute of Organic and Physical Chemistry–Kazan Research Center of the Russian Academy of Sciences, Kazan, Russian Federation
E-mail: abiliti7@yandex.ru

D. V. Milordov, Junior Research Assistant, Arbuzov Institute of Organic and Physical Chemistry–Kazan Research Center of the Russian Academy of Sciences, Kazan, Russian Federation
E-mail milordoff@ya.ru

Якубов Махмут Ренатович
420088, Российская Федерация, Республика Татарстан,
г. Казань, ул. Академика Арбузова, д.8
Тел.: (843) 272-73-44
E-mail: yakubovmr@mail.ru, yakubov@iopc.ru