

УДК 66.022.389:665.6.033.28

ВЛИЯНИЕ ПРИСАДОК РАЗЛИЧНОГО ТИПА НА АГРЕГАЦИЮ АСФАЛЬТЕНОВ И УСТОЙЧИВОСТЬ АСФАЛЬТЕНОСОДЕРЖАЩИХ ДИСПЕРСИЙ

© 2025 г. В. К. Королев, Е. С. Искандарова, А. В. Косач, Р. З. Сафиева*

*Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет)
им. И.М. Губкина», Москва, 119991
E-mail: safieva@mail.ru*

Поступила в редакцию 21.04.2025
После доработки 19.05.2025
Принята к публикации 16.06.2025

Влияние синтетических присадок различного типа на агрегацию асфальтенов, выделенных из ряда нефтей по стандартной методике, и устойчивость модельных асфальтеносодержащих дисперсий исследовано двумя независимыми оптическими методами. Показано, что исследованные присадки, проявляющие диспергирующие свойства, по-разному влияют на стабильность асфальтеносодержащих дисперсий и агрегацию асфальтенов в модельной среде *n*-гептана и толуола. Выявлена причина отсутствия диспергирующих свойств одной из присадок по отношению к асфальтенам, которая связана со склонностью данной присадки к самоассоциации в среде *n*-гептана с формированием мицелл радиусом более 100 нм, что ухудшает стабильность системы. Полученные результаты показывают необходимость учета склонности диспергирующих присадок к самоассоциации в неполярной среде и их химического сродства с асфальтенами при разработке соответствующих молекулярных формул диспергаторов и стабилизаторов.

Ключевые слова: устойчивость, нефтяные дисперсные системы, асфальтены, диспергирующие присадки

DOI: 10.53392/27823857-2025-5-1-130; EDN: KGEACK

Асфальтены находятся в нефтях в диспергированном состоянии. В составе их сольватной оболочки в нефтях присутствуют естественные стабилизаторы — межфазно-активные компоненты (смолы, нафтеновые кислоты). Считается, что асфальтены в нефтяных дисперсных системах (НДС) находятся в равновесии, при котором они частично растворены, а частично, в зависимости от состава нефти и фазовых условий, находятся в форме наночастиц. Асфальтены выступают в качестве дисперсной фазы НДС, и при изменении фазового равновесия (температуры, давления или состава дисперсионной среды) проявляют тенденцию к выпадению в осадок. Этой заключительной стадии предшествует постепенная агрегация молекул асфальтенов как наиболее полярных и наименее гидрофобных компонентов нефти, протекающая по механизму диффузионно-лимитированной агрегации [1]. Известно, что нефтяные асфальтены определяют, как вещества, растворимые в толуоле и нерастворимые в *n*-алканах. Общепринято проводить исследования свойств асфальтенов имен-

но в модельной среде гептана и толуола, известной под названием гептол. Поскольку асфальтены содержат высокомолекулярные гетероатомные соединения серы, азота и кислорода, а также разнообразные микроэлементы, представленные ванадием, никелем и железом в составе металлокомплексных соединений, происходит формирование супрамолекулярных структур в дисперсионной среде за счет действия различных типов межмолекулярного взаимодействия π -стэкинга, водородных связей, сил Лондона и кислотно-основных взаимодействий [2]. В последние годы в связи с развитием масс-спектрометрии ионно-циклотронного резонанса с преобразованием Фурье, в составе выделенных из нефти асфальтенов идентифицировано свыше 65 тысяч молекулярных формул [3]. Двойственность природы асфальтенов состоит и в разнообразии химического состава, с одной стороны, и в иерархичности их строения, с другой стороны [4]. Именно эти оба качества обеспечивают хорошо известное на практике свойство растворимости асфальтенов в различных по составу

растворителях, отражаемое шкалой Хотиера [5], и данными по параметру растворимости [6], что позволяет осуществлять подбор диспергаторов асфальтенов по близости значений энергии когезии и структуры молекул диспергатора. Показана успешность такого теоретического подхода к выбору диспергаторов по отношению к асфальтенам на основе учета параметра их растворимости по Хансену, экспериментально установлено, что амфифильные соединения типа нонилфенола эффективно стабилизируют асфальтены из-за адсорбции на их поверхности и создания стабильного стерического алкильного слоя [7]. Анализ экспериментальных методов контроля за процессом агрегации асфальтенов [8] приводит к выводу о перспективности методов спектроскопии ближней инфракрасной области (БИК-спектроскопии) [9].

С практической точки зрения полезно прогнозировать и управлять дисперсным состоянием асфальтеносодержащих дисперсий по ряду причин:

1. Выпадение асфальтенов при достижении давления насыщения нефти газом или при контакте нефти с буровым раствором в процессе добычи нефти приводит к кольтатации пласта и снижению его проницаемости.
2. Часто используемые на практике химические методы увеличения нефтеотдачи (ХМУН) могут привести к нежелательному выпадению асфальтенов. Например, такой метод как введение углекислого газа в нефтяной пласт оказывает дестабилизирующее действие на пластовые флюиды и приводит к нежелательному выпадению асфальтенов [10], дестабилизацию НДС вызывает также кислотная обработка пласта. Именно по этой причине в составе многих химических агентов для ХМУН предусмотрены растворители.
3. Прием компаундирования нефтей, включая их смешение с газоконденсатами и бионефтью, для достижения экономических выгод при последующей транспортировке и переработке, часто осложняется из-за несовместимости компонентов смесей с точки зрения нежелательного повышения вязкости и неаддитивного изменения фракционного состава смесей неоптимального состава.
4. Получение компаундированных нефтепродуктов на основе остаточного сырья требует учета их устойчивости и стабильности. Одним из современных актуальных вопросов является обеспечение устойчивости асфальтеносодержащих дисперсий как основы судовых топлив.

Выпадение и дальнейшее отложение асфальтенов в околоскважинной зоне приводит к повреждению пласта из-за частичной или полной закупорки по-

рового пространства и пагубно влияет на добычу нефти. Полностью исключить данную проблему можно с помощью эксплуатации скважин в таких термобарических условиях, которые находятся за пределами области выпадения асфальтенов на фазовых диаграммах, однако это не всегда возможно из-за наличия большого перепада давления в призабойной зоне скважины, добычи нефти в сложных производственных условиях (например, на больших глубинах), извлечении остаточной нефти с использованием ХМУН. Осаждение асфальтенов может также осложнять эксплуатацию подземных и наземных трубопроводов, а во время транспортировки нефти может произойти накопление асфальтенов в транспортных трубопроводах и танкерах. На нефтеперерабатывающих заводах асфальтены могут осаждаться в ректификационных колоннах, вызывать загрязнение теплообменников, а также дезактивировать катализаторы. Эти проблемы приводят к ухудшению эффективности технологических процессов и высоким затратам на регенерацию или замену катализаторов. Необходимое условие создания новых композиций тяжелых судовых топлив на основе нефтяного остаточного сырья — обеспечение устойчивости ее асфальтеносодержащей основы.

Для удаления образовавшихся отложений можно использовать ароматические растворители, полученные в процессе каталитического крекинга, однако их применение ограничено в связи с ужесточением требований к допустимым уровням выбросов летучих фракций. Также применяются комбинированные растворители. Для предотвращения формирования отложений асфальтенов применяют ингибиторы осаждения асфальтенов, которые препятствуют агрегации молекул асфальтенов и замедляют начало их флокуляции, и диспергаторы асфальтенов — они не влияют на точку флокуляции, но уменьшают размер флокулированных частиц асфальтенов и тем самым стабилизируют их в сырой нефти. Предполагается, что смолы действуют в качестве естественного диспергатора асфальтенов. Они имеют с асфальтенами схожие молекулярные характеристики, однако у смол обнаруживаются более длинные алифатические боковые цепи, что увеличивает их растворимость в алифатических растворителях [11].

Диспергаторы и ингибиторы формирования асфальтеновых отложений можно разделить на неполномерные органические соединения, полимеры с различными функциональными группами, ионные жидкости, наночастицы металлов и коммерческие ингибиторы. Эти вещества замедляют осаждение асфальтенов, образуя стабилизирующие оболочки посредством нековалентных взаимодействий: электронных (π - π -взаимодействия, диполь-дипольные

связи), кислотно-основных и координационных (комплексообразование с ионами металлов), а также за счет образования водородных связей [12].

В группу неполимерных органических соединений входят ароматические углеводороды, алкилфенолы, органические кислоты, ароматические амины, алкиламины, фосфорные эфиры и т.д. Однако, наличие полярных групп, таких как $-SOOH$, значительно повышает эффективность диспергаторов, обеспечивая более сильное взаимодействие с асфальтенами. Полярная головка по-разному связывается с молекулами асфальтенов. Сравнение алкилбензольных диспергаторов, содержащих различные полярные группы ($-COOH$; $-OH$; $-NH_2$; $-SOOH$), показывает, что алкилбензольный диспергатор, содержащий группу $-SOOH$, наиболее эффективен при стабилизации асфальтенов [13]. Также, длина алкильной цепи диспергатора влияет на стабилизацию асфальтенов: показано, что минимальная длина для *n*-алкилфенолов составляет около 6 атомов углерода. Взаимодействие между молекулой диспергатора полиизобутиленсукцинимидом, и асфальтенами преимущественно основано на образовании π - π -связи, с возможностью образования водородных связей и кислотно-щелочной реакции в зависимости от углеводородного радикала, присоединенного к ароматической части. Полиизобутиленовая часть помогает стабилизатору разрушать асфальтеновые агрегаты, а также создавать стерические препятствия, чтобы они не могли снова коагулировать [14].

Ионные жидкости представляют собой перспективный класс соединений для применения в качестве диспергаторов асфальтенов. Ионные жидкости — это расплавы солей (плавятся при температуре $100^\circ C$ или ниже), состоящие из органических катионов, связанных с органическими или неорганическими анионами. Взаимодействие асфальтенов и катионов ионных жидкостей происходит путем катион- π -взаимодействий с полиароматическими ядрами асфальтенов и электростатического притяжения к отрицательно заряженным группам. При этом, сила диспергирующего воздействия ионных жидкостей зависит от длины алкильной цепи и плотности заряда ионов. В частности, более длинные алкильные цепи и более гидрофобные ионы способствуют лучшей дисперсии асфальтеновых агрегатов. Результаты исследований показывают, что анионы ионных жидкостей могут играть более важную роль в диспергировании, чем катионы [15].

Также ученые рассматривают возможность использования наночастиц для снижения отложений асфальтенов. Наночастицы, обладая высокой удельной поверхностью, способны эффективно адсорбировать молекулы асфальтенов, ингибируя их

осаждение. Адсорбция асфальтенов на поверхности наночастиц определяется комплексом факторов, включающим свойства самих наночастиц (таких как поверхностная кислотность и основность), характеристики асфальтенов и условия окружающей среды. В основном, адсорбция протекает за счет полярных, кислотно-основных взаимодействий, а также за счет физической и химической адсорбции. Наночастицы с более выраженными кислотными свойствами и положительным зарядом, в частности, оксиды никеля (NiO) и алюминия (Al_2O_3) демонстрируют более высокую эффективность в связывании асфальтенов и предотвращении их осаждения, что обусловлено сильными полярными взаимодействиями с полярными молекулами асфальтенов [16].

Таким образом, поиск эффективных способов регулирования агрегации асфальтенов обеспечивает возможность прогнозируемого эффективного управления асфальтеносодержащими дисперсиями в разнообразных технологических операциях нефте-технологического цикла.

Целью данной работы являлось исследование особенностей протекания процесса агрегации и стабильности выделенных из разных нефтей асфальтенов в среде гептола без и с добавлением присадок двух разных типов, традиционно используемых в качестве диспергирующих для продуктов окисления нефтяных масел в процессе их старения.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве объектов исследования были выбраны образцы асфальтенов из трех нефтей: Мексиканской (образец АКAL), Западно-Сибирской (образец ЗС) и Самотлорской (образец С), выделенных по стандартной методике¹. Элементный анализ образцов асфальтенов приведен в табл. 1.

В качестве растворителя асфальтенов применяли толуол (АО «ЭКОС-1» ч.д.а.), а осадителя — *n*-гептан (АО «ЭКОС-1», ч.д.а.). В качестве присадок выбраны ССК-400 (ООО «ЭддиТек») и С-1500 (ООО «ЭддиТек»). Присадка ССК 400 представляет собой раствор высокощелочного синтетического сульфоната кальция в минеральном масле, произведенного на основе алкилбензолсульфонокислоты. Присадка С-1500 представляет собой беззольный сукцинимидный дисперсант, произведенный на основе полиизобутилена со средней молекулярной массой 1300.

¹ ASTM D6560–22. Стандартный метод определения содержания асфальтенов в сырой нефти и нефтепродуктах. [Электронный ресурс] URL: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/112911/d02fb89ae68b490595c52211376e02ac/ASTM-D6560-22.pdf> (дата обращения: 20.04.2025).

Таблица 1. Элементный состав образцов асфальтенов

Асфальтены	Содержание, мас%				
	C	H	N	O	S
AKAL	82.37	7.40	1.34	1.56	7.33
ЗС	84.70	7.79	1.33	1.38	4.16
С	85.50	7.71	1.25	2.26	2.42

В настоящей работе использованы два независимых оптических метода контроля свойств исследуемых асфальтеносодержащих дисперсий. Для оценки устойчивости коллоидной системы применяли метод БИК-спектроскопии и методику ASTM D7061¹. В данном исследовании использовался прибор MultiScan MS20 компании Data Physics, Германия. Метод БИК-спектроскопии позволяет определять устойчивость дисперсных систем путем измерения коэффициента пропускания образца по высоте пробирки. Интерпретацию полученных данных производили с помощью методики ASTM D7061. Согласно ей, к 2 мл раствора исследуемого образца в толуоле концентрацией 5 г/л добавляют 23 мл *n*-гептана. Содержимое пробирки перемешивают в течение 6 с и помещают в кювету для оптических измерений. Сканирование образца проводят каждую минуту в течение 15 мин и рассчитывают значение коэффициента стабильности (Stability Index) SI согласно формуле (1):

$$SI = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - X_T)^2}{n - 1}},$$

где X_i — среднее значение пропускания за каждые 60 с измерений, X_T — среднее значение X_i , n — число измерений.

Качественно оценивают устойчивость исходя из полученного значения SI (табл. 2).

Присадки ССК-400 и С-1500 добавлялись в концентрации 0.1 мас% к дисперсиям, остальная пробоподготовка для исследования их устойчивости оставалась без изменений.

Для исследования особенностей протекания агрегации асфальтенов при различном составе дисперсионной среды использовали метод динамического рассеяния света (ДРС) на приборе Photocor Complex (ООО Фотокор, Россия). Измерения проводили под

Таблица 2. Устойчивость нефти в зависимости от индекса SI (согласно ASTM D7061)

Значение SI	Уровень устойчивости исследуемого образца
<5	Высокая
5–10	Средняя
>10	Низкая

углом 90°, мощность лазера 35 мВт, длина волны лазера 635 нм. Регистрация каждой автокорреляционной функции занимала 30 с. Данный метод подходит для анализа прозрачных жидкостей, его применение в случае темных и сильно поглощающих систем, в частности, растворов асфальтенов, требует достаточно сильного разбавления образцов для обеспечения их оптической прозрачности. Обработка результатов ДРС производилась для временных интервалов от начала измерений до 150–200 мин. На более длительных интервалах затруднительно корректно рассчитать размеры частиц агрегатов асфальтенов из-за возрастающей полидисперсности системы. Полученные в ходе измерений автокорреляционные функции обрабатывались с помощью программы DynaLS, позволяющей определить средний гидродинамический радиус частиц в образце. Для данного метода готовились растворы исследуемых образцов асфальтенов в толуоле в концентрации 0.1 г/л. К растворам для исследования агрегации добавлялся *n*-гептан в рассчитанной концентрации выше точки онсет (от 60 до 75 об% с шагом в 5 об%), образец перемешивался в течение 6 с и помещался в прибор. Исследования с добавлением присадок проводили при 75 об% концентрации *n*-гептана, так как было замечено, что при увеличении концентрации осадителя процесс агрегации асфальтенов протекает наиболее интенсивно, концентрация обеих присадок равнялась 0.1 мас%.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При исследовании устойчивости асфальтеносодержащих дисперсий по методике ASTM D7061, было выяснено, что добавление присадки ССК-400

¹ ASTM D7061-23. Стандартный метод испытаний для измерения фазового разделения асфальтеносодержащих нефтей с помощью оптического сканирующего устройства. [Электронный ресурс] URL: <https://store.astm.org/d7061-23.html> (дата обращения: 20.04.2025).

Таблица 3. Значение коэффициента устойчивости для модельной смеси асфальтенов нефти АКАЛ без и с добавками по методике ASTM D7061

Состав образца	SI
Асфальтены АКАЛ	5.323
Асфальтены АКАЛ + 0.1 мас% присадка ССК-400	0.033
Асфальтены АКАЛ + 0.1 мас% присадка С-1500	5.137

сильно влияет на устойчивость образцов. Исходя из табл. 3 видно, что стабильность дисперсии асфальтенов нефти АКАЛ без добавления присадок является средней и практически не увеличивается при добавлении присадки С-1500, в то время как устойчивость при добавлении ССК-400 значительно повышается.

Графики на рис. 1 представляют общий вид кривых агрегации асфальтенов при исследуемых концентрациях *n*-гептана.

При концентрации *n*-гептана в 60 об% размер агрегатов в поле лазерного луча остается почти неизменным и составляет 80 нм. Для концентраций 65–75 об% наблюдается продолжение роста частиц с максимальным размером в 300 нм для кривой с 75 об% *n*-гептана, после которого наблюдается уменьшение размеров частиц из-за преобладания процесса седиментации над процессом агрегации. Для асфальтенов нефти С кривые агрегации при концентрации *n*-гептана в 65–70 об% сохраняют тенденцию к росту за пределами 150 мин.

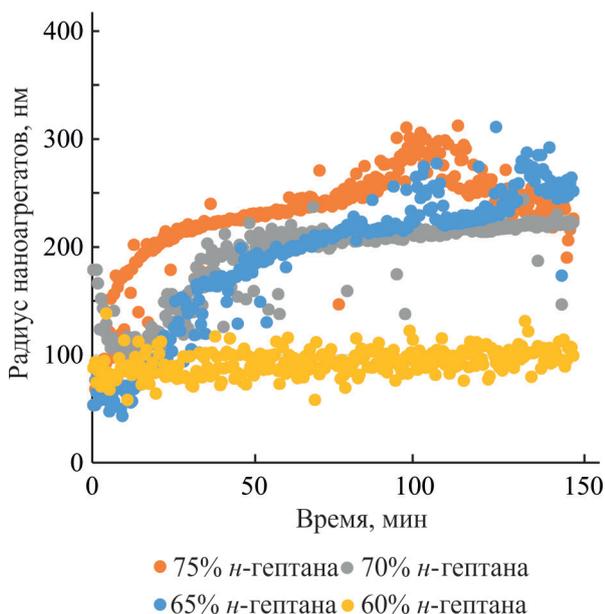


Рис. 1. Изменение размера наночастиц асфальтенов нефти С от времени при различных концентрациях *n*-гептана.

В присутствии диспергирующей присадки ССК-400 наблюдалось подавление как процесса агрегации, так и седиментации асфальтенов (рис. 2, табл. 4).

Несмотря на общий вид кривых для исследуемых растворов, наблюдаются заметные различия в диапазоне изменения размеров и времени достижения максимума на кривых (рис. 1, 2). Полученные данные приведены в табл. 4.

При исследовании особенностей процесса протекания агрегации исследуемых асфальтенов в присутствии присадки С-1500 уменьшения интенсивности процессов агрегации и седиментации не происходило, а также наблюдались частицы более крупных размеров, чем в системе без присадки (рис. 3), что коррелирует с ранее полученными данными (табл. 3). Было выдвинуто предположение о склонности данной присадки к самоассоциации в исследуемой дисперсионной среде. При дополнительном исследовании гептольных растворов с добавлением 0.1 мас% присадки С-1500 без асфальтенов методом ДРС было выяснено, что при достижении концентрации *n*-гептана в 10 об% наблюдается самоассоциация молекул присадки с формированием частиц радиусом ≥ 100 нм, что отрицательно сказывается на ее диспергирующей способности. Дальнейшее

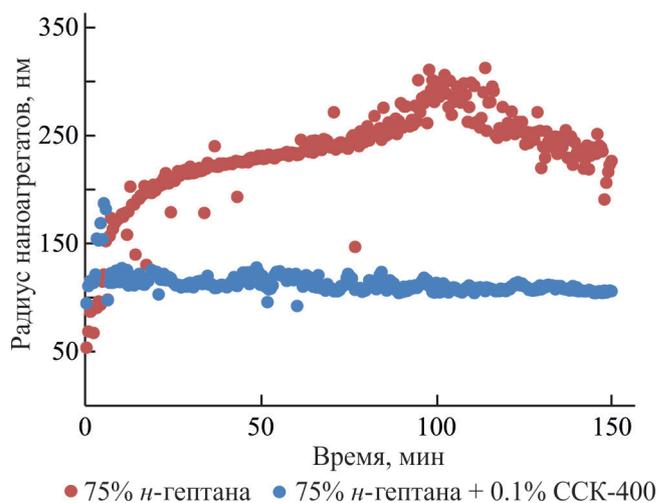


Рис. 2. Изменение размера наноагрегатов асфальтенов нефти С от времени в присутствии присадки ССК-400.

Таблица 4. Параметры протекания агрегации асфальтенов при различном составе дисперсионной среды

Асфальтены	Концентрация <i>n</i> -гептана	Предельный размер агрегатов, нм	Время достижения предельного размера агрегатов, мин
AKAL	60 об%	400	100
	65 об%	420	50
	70 об%	440	120
	75 об%	>440	>170
	75 об% + 0.1 мас% ССК-400	105	3
ЗС	60 об%	340	60
	65 об%	380	40
	70 об%	>270	>80
	75 об%	>320	>80
	75 об% + 0.1 мас% ССК-400	140	5
С	60 об%	100	20
	65 об%	>270	>150
	70 об%	>230	>150
	75 об%	300	100
	75 об% + 0.1 мас% ССК-400	115	7

повышение концентрации *n*-гептана приводит к укрупнению частиц присадки.

Скорее всего, данный эффект наблюдается из-за того, что после добавления определенного количества *n*-гептана, полярность раствора увеличивается до значения, когда полярным сукцинимидным группам присадки термодинамически выгоднее формировать мицеллы в растворе. Предположительно,

данный эффект обусловлен снижением сольватирующей способности среды вследствие увеличения объемной доли неполярного растворителя. При превышении порогового значения концентрации *n*-гептана система теряет способность к компенсации полярных сукцинимидных функциональных групп присадки. Это приводит к формированию обратных мицелл и снижению возможности диспергирующего воздействия на асфальтены.

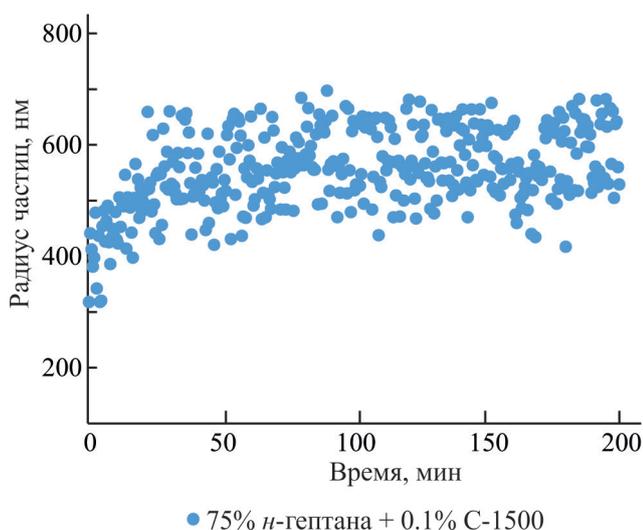


Рис. 3. Изменение размеров наночастиц в системе: 0.1 г/л асфальтенов нефти AKAL в толуоле при добавлении 75 об% *n*-гептана в присутствии 0.1 мас% присадки С-1500.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методы контроля процесса кинетической устойчивости с применением двух оптических методов позволяют отслеживать влияние присадок на стабильность и изменения размеров частиц асфальтенов в модельных системах.

Двумя независимыми методами показаны количественные и качественные отличия в характере влияния синтетических присадок различного строения на устойчивость разбавленных дисперсий асфальтенов, выделенных из трех различных нефтей. Присадка ССК-400 обладает выраженными диспергирующими свойствами, что подтверждается не только повышением стабильности, но и уменьшением радиуса наночастиц асфальтенов для соответствующих дисперсий. В то время как присадка С-1500 не проявляет диспергирующего эффекта по отношению к асфальтенам, а склонна к самоассоциации уже при

10 об% содержания гептана в растворе. Подобные различия в поведении присадок обусловлены различиями в особенностях их химической структуры. Способность алкилароматических фрагментов присадки ССК-400 взаимодействовать с полициклической ароматической структурой асфальтенов приводит к диспергированию последних с зафиксированным методом динамического рассеяния света уменьшением наблюдаемых размеров агрегатов асфальтенов в 3-4 раза, что обеспечивает многократное повышение стабильности соответствующих растворов. Присадка С-1500 в аналогичных условиях проявляет себя иначе — ее молекулы в гептане ассоциируют с образованием собственных мицелл и не взаимодействуют с молекулами асфальтенов.

Авторы полагают, что и при подборе диспергирующих присадок применение описанных оптических методов будет полезным для предупреждения образования наночастиц будущих загрязнений, возникающих при длительной эксплуатации масел, поскольку в первом приближении асфальтеносодержащие дисперсии можно рассматривать как модельные системы для физико-химического анализа коллоидно-химических аспектов взаимодействия присадок с поверхностью частиц будущих загрязнений при нормальных условиях.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания, проект FSZE-2024-0004.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Королев Виталий Константинович

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-8182-1013>

Искандарова Елена Сергеевна

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-8525-2285>

Косач Анна Владимировна

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6014-7447>

Сафиева Равиля Загидулловна, д.т.н., профессор

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1774-4175>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Asimov M.A., Ganeeva Y.M., Gorodetskii E.E., Deshabo V.A., Kosov V.I., Kuryakov V.N., Yudin D.I.,*

Yudin I.K. Effects of resins on aggregation and stability of asphaltenes // *Energy and Fuels*. 2014. V. 28. N 10. P. 6200-6209.

<https://doi.org/10.1021/ef501145a>

2. *Chacon-Patino M.L., Gray M.R., Rüger C., Smith D.F., Glatke T.J., Niles S.F., Rodgers R.P.* Lessons learned from a decade-long assessment of asphaltenes by ultrahigh-resolution mass spectrometry and implications for complex mixture analysis // *Energy & Fuels*. 2021. V. 35. N 20. P. 16335-16376.
<https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.1c02107>
3. *Gray M.R., Tykwinski R.R., Stryker J.M., Tan X.L.* Supramolecular assembly model for aggregation of petroleum asphaltenes // *Energy & Fuels*. 2011. V. 25. N 7. P. 3125-3134.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.130293>
4. *Mullins O.C.* The modified yen model // *Energy & Fuels*. 2010. V. 24. N 4. P. 2179-2207.
<https://doi.org/10.1021/EF900975E>
5. *Hotier G., Robin M.* Effects of different diluents on heavy oil products: measurement, interpretation, and a forecast of asphaltene flocculation // *Revue de l'IFP*. 1983. V. 38. P. 101.
6. *Morimoto M., Fukatsu N., Tanaka R., Takanohashi T., Kumagai H., Morita T., & Yamamoto H.* Determination of Hansen solubility parameters of asphaltene model compounds. // *Energy & Fuels*. V. 32. N 11. P. 11296-11303.
<https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.8b02661>
7. *Laux H., Rahimian I., Butz T.* Theoretical and practical approach to the selection of asphaltene dispersing agents. // *Fuel Processing Technology*. 2000. V. 67. N 1. P. 79-89.
[https://doi.org/10.1016/S0378-3820\(00\)00087-4](https://doi.org/10.1016/S0378-3820(00)00087-4)
8. *Safieva R.Z.* Control of initial phase-forming stages in oil disperse systems // *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*. 2020. V. 56. N 2. P. 205-211.
<https://doi.org/10.1007/s10553-020-01130-w>
9. *Oh K., Deo M.D.* Effect of organic additives on the onset of asphaltene precipitation // *Energy & Fuels*. 2002. V. 16. N 3. P. 694-699.
10. *Косач А.В., Кравченко М.Н., Королев В.К., Новиков Е.А., Гришина И.Н., Сафиева Р.З.* Новый метод контроля устойчивости асфальтеносодержащих дисперсных систем // *Петролеомика*. 2024. Т. 4. № 1. С. 75-81 [*Kosach A.V., Kravchenko M.N., Korolev V.K., Novikov E.A., Grishina I.N., Safieva R.Z.* A new method for monitoring the stability of asphaltene-containing disperse systems // *Petroleum Chemistry*. 2024. V. 64. N 5. P. 580-587.
<https://doi.org/10.1134/S0965544124040091>].
11. *Kraiwattanawong K., Fogler H.S., Gharfeh S.G.* Effect of asphaltene dispersants on aggregate size distribution and growth // *Energy & Fuels*. 2009. V. 23. N 3. P. 1575-1582.
<https://doi.org/10.1021/ef800706c>
12. *Marcano F., Moura L.G., Cardoso F.M., Rosa P.T.* Evaluation of the chemical additive effect on asphaltene

- aggregation in dead oils: A comparative study between ultraviolet–visible and near-infrared-laser light scattering techniques // *Energy & Fuels*. 2015. V. 29. N 5. P. 2813–2822.
<https://doi.org/10.1021/ef502071t>
13. *Stratiev D., Nikolova R., Veli A., Shishkova I., Toteva V., Georgiev G.* Mitigation of asphaltene deposit formation via chemical additives: A review // *Processes*. 2025. V. 13. N 1. P. 141–176.
<https://doi.org/10.3390/pr13010141>
14. *Chávez-Miyauchi T.E., Zamudio L., Barba V.* Aromatic polyisobutylene succinimides as viscosity reducers with asphaltene dispersion capability for heavy and extra-heavy crude oils // *Energy & Fuels*. 2013. V. 27. N 4. P. 1994–2001.
<https://doi.org/10.1021/ef301748n>
15. *Baghersaei S., Mokhtari B., Pourreza N., Soltani S.B.* Tetraalkylammonium and phosphonium salt for asphaltene dispersion; experimental studies on interaction mechanisms // *Egyptian Journal of Petroleum*. 2022. V. 31. N 3. P. 77–81.
<https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2022.07.004>
16. *Alizadeh S., Fazelipour F., Mousavi S.M., Mansourian R., Qajar J.* A comparative experimental evaluation of the performance of additive compounds for inhibition of asphaltene precipitation from crude oil // *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. 2021. V. 47. N 1. P. 7113–7131.
<https://doi.org/10.1080/15567036.2021.1916131>
-